



I.E.R.
INSTITUT D'ECONOMIE RURALE
DU MALI

FONCTIONNEMENT DES NAPPES EN RELATION AVEC LA DÉGRADATION DES SOLS A L'OFFICE DU NIGER

**Jean-Pierre Barral, Serge Marlet, Mamadou Kabirou N'Diaye,
Alexis Valenza, Mohamed K. Dicko, Bréhima Tangara, Jean-Claude Grillot.**

Novembre 1996

PSI MALI
TRAVAUX ET ETUDES N°2

Fonctionnement des nappes en relation avec la dégradation des sols à l'Office du Niger

Jean-Pierre Barral

Serge Marlet

Mamadou Kabirou N'Diaye

Alexis Valenza

Mohamed K. Dicko

Bréhima Tangara

Jean-Claude Grillot

Introduction:

Après près de 50 ans de mise en valeur des périmètres irrigués de l'office du Niger, des symptômes de dégradation des sols par salinisation, alcalinisation ou sodisation apparaissent localement sur les parcelles irriguées. Ils sont aujourd'hui une préoccupation importante pour les producteurs et les opérateurs du développement. En riziculture, les superficies affectées seraient de 4 à 7%, mais pourraient atteindre localement 13 à 15 % des superficies. Les secteurs maraichers apparaissent plus dégradés; les superficies affectées seraient en moyenne de 20% et varieraient de 10 à 25 % selon les secteurs (Barral et Dicko, 1996).

Ce phénomène est évolutif. Dabin (1951) notait que les terres du delta intérieur n'étaient ni salées, ni sodiques et que leur pH était acide. Après 30 années d'irrigation, Toujan (1980) a pu apprécier l'évolution des sols en comparant ses résultats aux analyses de Dabin; ses conclusions mettent en évidence:

- une chute de la perméabilité des sols d'environ 300%;
- une diminution du taux d'agrégats stables de 50%;
- une augmentation de 200% du taux de sodium échangeable qui peut localement atteindre 15% de la capacité d'échange cationique des sols;
- une augmentation du pH d'une unité pouvant localement dépasser 8.5.

Ces observations ont ensuite été confirmées par de nombreuses études qui mettent en évidence des valeurs élevées du pH, du taux de sodium échangeable ou de la conductivité électrique (Bertrand, 1985; N'Diaye, 1987; Coulibaly, 1988, 1989; Van Driel, 1989; Vallès *et al.*, 1989, N'diaye *et al.*, 1990; Keita *et al.*, 1992; Van Hoorn, 1992; Bertrand *et al.*, 1993; Dicko et N'diaye, 1994; Winja et Bruggenwert, 1994, Bertrand *et al.*, 1994; Barral et Dicko, 1996; Keita, 1996) même si les auteurs divergent parfois quant à leur appréciation de la gravité du phénomène ou de sa tendance évolutive. Pour les uns, il s'agit d'un phénomène grave qui met en péril la pérennité des aménagements de l'office du Niger. Pour les autres, ce phénomène reste localisé et l'amélioration de la maîtrise de l'eau liée à la réhabilitation des périmètres est susceptible de prévenir une extension de la dégradation; le lessivage des sels serait faible mais suffisant pour maintenir la dégradation à un niveau modéré.

Les causes du phénomène semblent liées au fonctionnement hydrologique du milieu.

Lors de la construction des aménagements, la nappe se situait à une profondeur de 30 mètres dans le kala supérieur et jusqu'à 40 à 50 mètres dans le kouroumari. En 1964, la jonction de la nappe avec l'eau des rizières lors des irrigations est mise en évidence (mission soviétique, 1964, cité dans SOGREAH, 1982). Depuis au moins 30 ans, la nappe est subaffleurante dans les périmètres au cours de la saison pluvieuse sous culture de riz. Ces conditions ont pu favoriser la concentration des solutés en limitant le lessivage pendant la saison de culture et en favorisant les remontées capillaires pendant la saison sèche.

Ce rapport se propose de faire la synthèse des données disponibles concernant la dynamique et les propriétés des nappes et leur contribution aux phénomènes d'alcalinisation-sodisation des sols de l'office du Niger. Seront successivement abordés le fonctionnement hydrologique des nappes à l'échelle régionale, à l'échelle des périmètres du kala inférieur, puis à l'échelle de trois arroseurs expérimentaux. La géochimie de ces différents aquifères sera ensuite étudiée. A travers cette étude, on cherche à répondre aux questions suivantes:

- Quelle est la structure des différents aquifères ? Sont-ils en continuité hydraulique ?
- La teneur en sels dissous de la nappe phréatique dérive-t-elle uniquement de la concentration des eaux d'irrigation, ou des sources de salinisation primaire existent-elles dans le sous-sol ? Quelle est son influence éventuelle sur l'état d'avancement des processus de salinisation/alcalinisation des nappes dans les secteurs irrigués de l'office du Niger ?
- Quelle est la fraction de lessivage permise par le drainage naturel de la nappe ? Quelle en est la conséquence sur la dégradation des sols et la vitesse de ces phénomènes ?
- A une échelle plus grande (échelle de l'arroseur), quelle est l'influence du type de sol et du système de culture sur la dynamique et la concentration des nappes ?

Différentes actions menées dans le cadre du PSI- MALI ont permis de mener à bien ce travail:

- Une mission d'appui du Pr. Grillot de l'Université de Montpellier II.
- Un stage de DEA (Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental) effectué par A. Valenza, avec deux mois de travail sur le terrain et deux mois d'analyse de donnée.
- Une prospection géophysique d'un bureau d'étude spécialisée, menée en collaboration avec le stagiaire et l'équipe du PSI.
- Les suivis de nappe phréatique sur des parcelles tests, couplés à l'étude des sols et de la conduite des irrigations

L'aide de la DNHE (Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie) nous a permis d'utiliser la base de données SIGMA établie dans le cadre du projet PNUD, et les documents ou les forages récents concernant la zone de Niono. Enfin la Synthèse Hydrogéologique du Mali (PNUD, 1990) est le document de base sur lequel s'appuie l'étude régionale.

1. Les aquifères dans le delta mort du Niger.

1.1. Les différents niveaux aquifères.

La dynamique de la nappe phréatique à l'échelle du Delta mort et de l'Office du Niger met en jeu trois strates géologiques.

- La couverture quaternaire
- Le continental terminal-Quaternaire
- Le substratum infracambrien

La couverture quaternaire est constituée par les alluvions anciennes ou récentes, dues au réseau du Niger aussi bien fossile qu'actuel. Dans le Kala, il s'agit d'alluvions anciennes constituées par des terrains argilo-sableux, d'une épaisseur comprises entre 5 et 10 mètres. Les formations quaternaires d'origine alluviales, lacustres ou éoliennes ne sont aquifères et en liaison hydraulique avec la nappe principale que dans les zones inondables, ou les zones irriguées.

L'aquifère du Continental terminal - Quaternaire couvre les vastes plaines alluviales qui s'étendent de part et d'autre du fleuve Niger à l'aval de Ségou jusqu'à Gao. Sa superficie totale est proche de 200 000 Km². Il est représenté par des alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables fins à grossiers, souvent en disposition lenticulaire et localement grésifiés. Des niveaux de graviers de quartz et horizons latéritiques argileux ou concrétionnés sont fréquemment intercalés dans les parties moyennes et inférieures des formations continentales. Son épaisseur varie de 10 à 60 mètres. Les caractéristiques hydrogéologiques de cet aquifère sont liées à la présence d'eaux de surface permanentes et à l'extension des zones d'inondation couvertes par les crues du Niger.

Le secteur Ouest du delta intérieur correspond à la zone du delta mort ou delta fossile du Niger qui était fonctionnel à l'Holocène. Les formations continentales sont relativement peu épaisses (30 à 80 m) en raison d'une remontée d'un haut-fond gréseux du substratum infracambrien. La réduction d'épaisseur des dépôts s'accompagne d'une augmentation de leur composante argileuse. Les périmètres d'irrigation de l'Office du Niger alimentés par les eaux du canal du Sahel, dérivées du Niger au Barrage de Markala, occupent la bordure Ouest de ce secteur et participent à la recharge de cette unité.

Les limites de l'aquifère du Continental Terminal sont constituées par les affleurements du **substratum infracambrien**. Ce sont des roches massives et dures, composées de grès siliceux et siliciés. Ces grès sont parcourus par un système de fractures, de diaclases, de failles qui donnent un aspect ruiniforme caractéristique lorsqu'ils affleurent à l'ouest des périmètres du Kala inférieur. Ces grès ne sont ni poreux, ni perméables, mais leur réseau de fissures, diaclases et failles, très important, est à l'origine d'une circulation d'eau intense, formant un régime de nappe d'interstices. Des biseaux secs sont localisés en bordure de certains secteurs où les formations continentales, peu épaisses par suite de la remontée du substratum, sont dénoyées.

En conclusion, la principale formation aquifère de la zone est le Continental Terminal Quaternaire. C'est dans cette formation que sont effectués la plupart des forages productifs de la région.

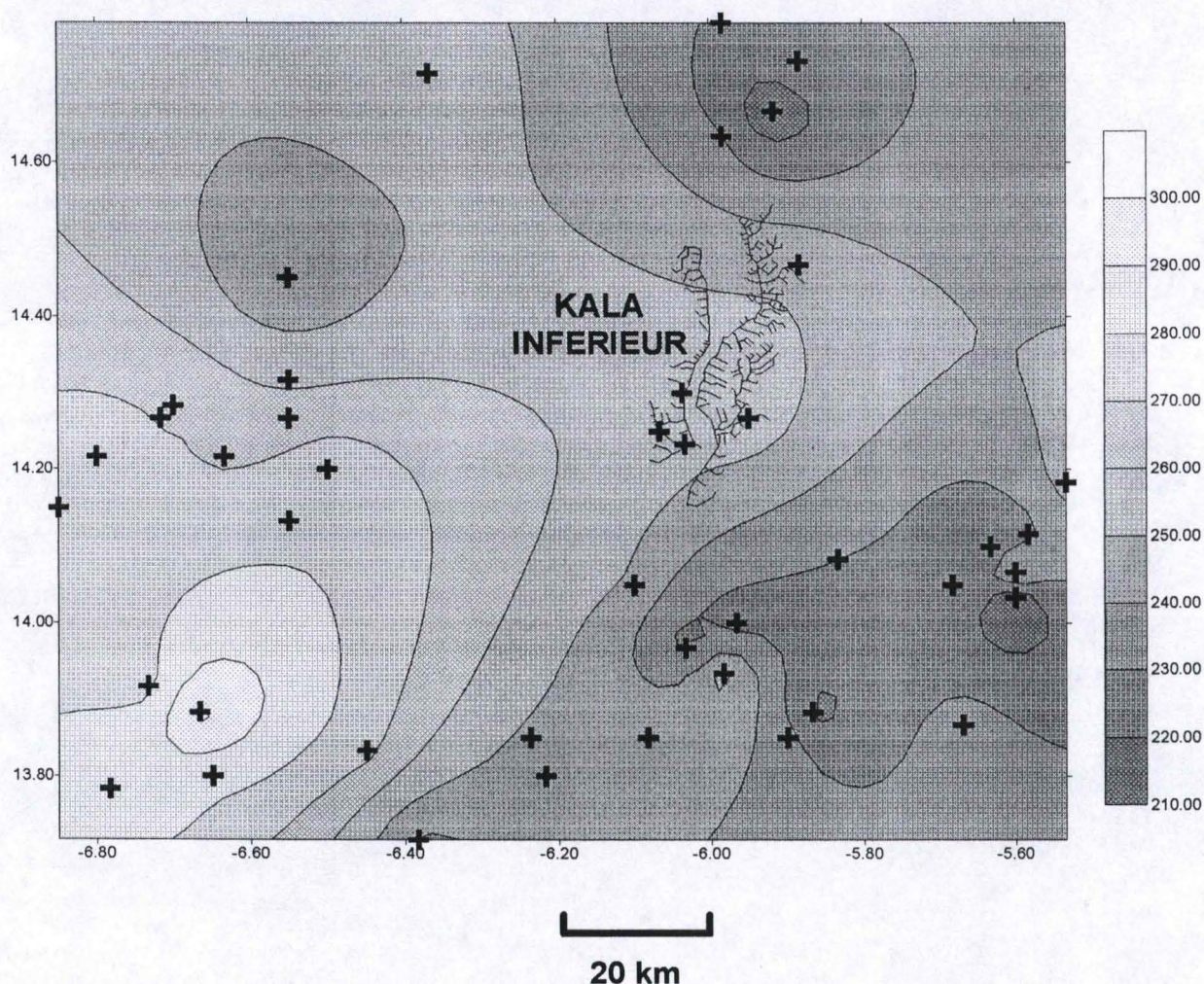
1.2. Morphologie de l'aquifère du Continental Terminal Quaternaire.

A partir de données stratigraphiques de 50 forages (Valenza, 1996), une carte du mur du continental (figure 1.1) a été effectuée dans une zone de 100 km de coté englobant le Kala inférieur.

Il apparaît un pendage irrégulier du mur du continental vers l'est. Au niveau des périmètres irrigués du Kala inférieur, l'altitude du mur du continental varie entre 250 et 255 mètres. Au sud, à l'est et au nord, le mur du continental s'abaisse jusqu'à 230 mètres. Le sol dans cette zone étant plat, et les alluvions ayant une épaisseur moyenne de 5 à 10 mètres, on déduit de ces observations qu'au droit du Kala inférieur le continental a une épaisseur d'une vingtaine de mètres; il s'épaissit à l'est des périmètres, atteignant une épaisseur de 40 mètres.

Les périmètres du Kala inférieur sont donc situés sur un haut fond du substratum. Si on considère le substratum comme le mur du Continental Terminal, l'épaisseur de cet aquifère est relativement plus faible au droit des périmètres irrigués qu'à l'est de ceux-ci. Cela a pu favoriser la remontée de la nappe phréatique, le remplissage du niveau du Continental étant rapide du fait de sa faible épaisseur.

Figure 1.1 : Morphologie du mur du Continental Terminal (Toit du Substratum gréseux)

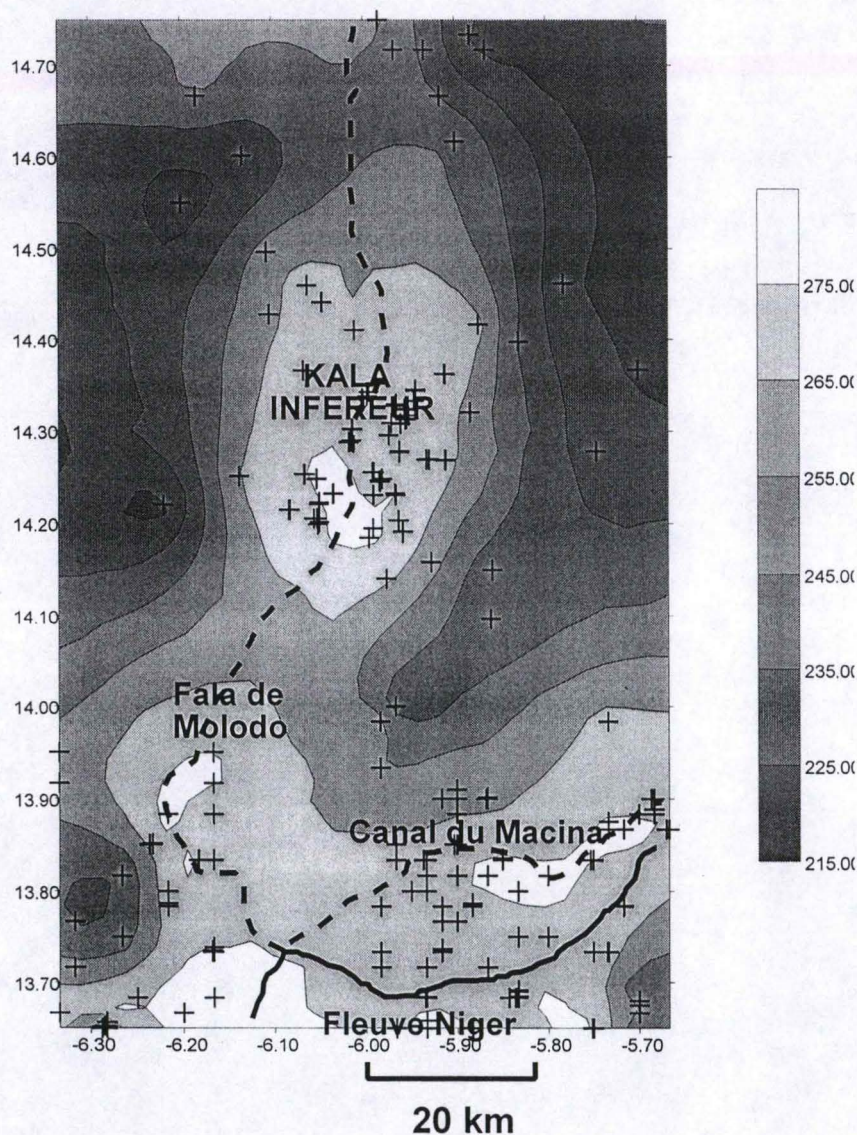


Les courbes iso-valeurs (altitude absolue) de mur du continental sont obtenues à partir de l'interpolation par krigeage (Winsurf 6.0) des profondeurs mesurées au niveau des forages d'eau (croix).

1.3. Dynamique de la nappe du Continental Terminal Quaternaire.

La figure 1.2 représente une carte régionale de la piézométrie. La topographie de la zone est très plate, à une valeur moyenne de 275 m. A proximité du Niger, du Fala et des périmètres irrigués (Kala inférieur, périmètres sucriers au sud de Niono, périmètres du Macina), la nappe est proche de la surface. Lorsqu'on s'éloigne de ces sources d'alimentation, le niveau de la nappe baisse graduellement.

L'aquifère est alimenté par les eaux du fleuve Niger et les eaux utilisées pour l'irrigation dans les périmètres irrigués de l'Office du Niger. Le niveau de la nappe baisse rapidement avec l'éloignement des périmètres de l'Office, ce qui traduit la faible transmissivité du milieu.



Ligne isopièze (altitude absolue) dans la région de l'Office du Niger à partir de l'interpolation par krigeage (Winsurf 6.0) des hauteurs d'eau mesurées dans les puits de la zone (croix).

Figure 1.2 : Carte piézométrique de la région de l'Office du Niger.

Des analyses isotopiques effectuées sur des eaux prélevées sur cinq sites le long d'une ligne radiale recoupant une partie des deltas vifs et fossiles montrent que (PNUD, 90) la vitesse réelle d'écoulement est faible, de l'ordre de 15 à 20 m par an. Ceci s'explique par le fait que des lentilles sableuses sont sans continuité et inter-stratifiées dans des dépôts silto-argileux de perméabilité beaucoup plus faible. Ceci signifie que la perméabilité moyenne globale des formations du Continental terminal/Quaternaire est plus petite que ne le laisse supposer les pompages d'essai.

Un modèle permet de rendre compte du fonctionnement de l'aquifère du Continental Terminal/Quaternaire entre le Kala inférieur et le Niger (PNUD, 1990).

☞ Les apports sont représentés par :

- l'infiltration de la pluie dans les secteurs où la surface piézométrique est située à moins de 30 m de profondeur.
- La percolation des eaux de surface pour les mailles couvrant la zone d'inondation du delta intérieur
- Le retour des eaux d'irrigation pour les mailles où sont localisés les périmètres de l'Office du Niger et la zone de recharge du canal du Sahel.

☞ Les sorties sont représentées uniquement par l'évapotranspiration

Le calage du modèle a permis de reconstituer les principales caractéristiques piézométriques du secteur, et notamment :

- la dépression piézométrique localisée dans le delta fossile
- les niveaux d'eau peu profonds dans la zone d'inondation.
- La remontée locale du niveau des nappes à l'aplomb des périmètres irrigués.

Deux valeurs de transmissivité ont été adoptés : 5.10^{-4} m²/s dans la zone du delta fossile et 7.10^{-4} m²/s dans le reste du secteur modélisé.

2. Fonctionnement et structure des aquifères dans le Kala inférieur.

Après cette approche régionale de la dynamique de la nappe du Continental Terminal / Quaternaire permettant de comprendre son fonctionnement à grande échelle, on va s'intéresser plus particulièrement à la dynamique de la nappe phréatique dans le Kala Inférieur, alimentée par les périmètres irrigués et les anciens défluent remis en eau.

2.1 Prospection géophysique

L'objectif de l'étude était de déterminer les épaisseurs des différents horizons sur la totalité de la zone (alluvions quaternaires, sables continentaux et substratum gréseux), ainsi que de caractériser les liens pouvant exister entre les différentes nappes. En effet, la succession des différentes couches géologiques laisse prévoir l'existence d'un aquifère multicouches alluvions - continental - grès. Cette étude géophysique a été menée pendant 10 jours, avec la collaboration du Bureau de Recherche et d'Exploitation des Eaux Souterraines et de Surface (B.R.E.E.S.S.).

Un profil électrique et 45 sondages électriques ont été exécutés suivant des transects de direction différente couvrant une grande partie de la zone de l'Office. Les données stratigraphiques de 6 forages de la zone ont permis de caler ces différentes coupes. Les résultats obtenus sont cohérents avec les résultats d'une prospection électro-sismique (PNUD, 1979) en lisière des périmètres irrigués sur le ranch de Niono. La figure 3.3 montre deux exemples de coupe géophysique (BREESS, 1996). Au KL3 (coupe 1), l'épaisseur des alluvions et du Continental est très faible, sous l'influence de la remontée du substratum. Sur la coupe 2, les terrains sont relativement réguliers, le continental a une épaisseur moyenne de 30 m.

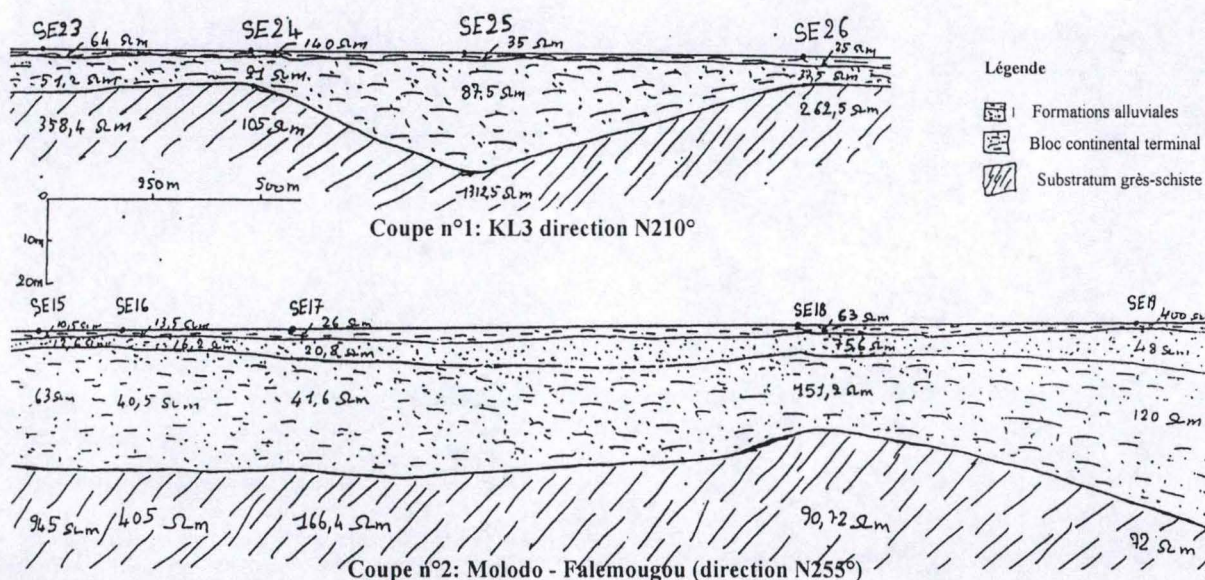


Figure 3.3 : Coupes géophysiques effectuées dans le Kala Inférieur

2.1.1. Le substratum

C'est le terrain le plus accidenté. Sa profondeur sur l'ensemble de la zone est de 40 m en moyenne, mais on le trouve à plusieurs endroits à 20 m, ou à seulement 10 m.

Il semblerait que la nature du substratum puisse changer au Sud de la zone irriguée, passant des grès au schistes, par un système de lentilles ou de changements latéraux de faciès.

A chaque bombement du substratum, correspond une baisse de résistivité. On pourrait traduire cela par une altération plus importante de ces zones lorsqu'elles étaient encore à l'air, ce qui pourrait avoir engendré des fractures et hydrolyses laissant de larges espaces au passage des eaux.

2.1.2 Le continental

Il est tributaire de la morphologie du substratum, car aux zones de haut-fond du substratum, correspond une moindre épaisseur du continental. Les résistivités apparentes du continental vont du simple au quintuple, traduisant une forte hétérogénéité des terrains, que l'on sait hétérogènes par la nature sableuse, argileuse, argilo-sableuse et conglomératique des dépôts.

L'épaisseur maximale du continental est de 40 m dans la zone, avec une moyenne à 30 m et un minimum de 10 m.

2.1.3. Le Quaternaire alluvial

On a pu différencier deux couches lors des sondages électriques:

- la couche de surface, indurée, sèche, de 2 m d'épaisseur environ, de résistivité élevée
- la couche profonde, plus humide, de 5 à 8 m d'épaisseur, de résistivité plus faible.

Par endroit, l'horizon alluvial peut être très peu épais (2 m), en liaison avec une remontée du toit du substratum.

L'épaisseur moyenne du quaternaire alluvial est de 8 m, augmentant légèrement dans les dépressions du continental.

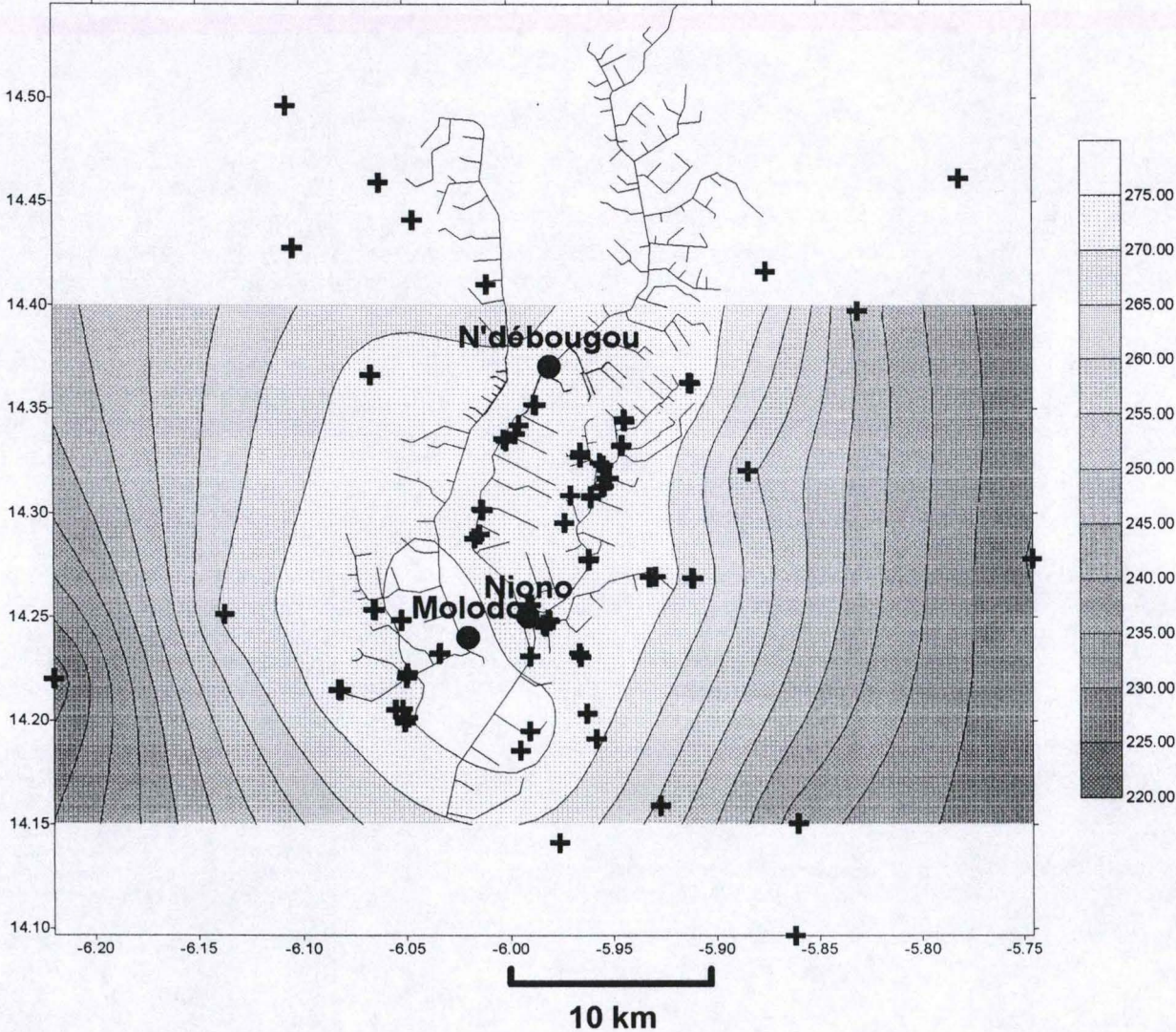
2.1.4. Conclusion

On observe une grande variation des épaisseurs et de la morphologie des différents horizons. Certains sites, caractérisés par une faible épaisseur d'alluvions sablo-limoneuses, sont particulièrement perméables. Ils constituent une zone d'écoulement préférentiel, réalimentant la nappe phréatique. Ces zones ont aussi contribué à la remontée rapide de la nappe phréatique, de 40 m en moins de 30 ans (Barral et Dicko, 1996).

Les faibles contrastes de résistivité électrique entre le système alluvionnaire et le Continental argilo-sableux sous-jacent d'une part; l'absence de rupture de pente observée sur les courbes de remontée des sondages électriques entre Continental argilo-sableux et bed-rock gréseux d'autre part, **montrent qu'une continuité hydraulique existe entre ces trois horizons** (Valenza, 1996).

2.2. Dynamique de l'aquifère dans le Kala inférieur.

La figure 1.4 représente une carte de la piézométrie centrée sur le Kala Inférieur en novembre 95. Des relevés de puits en zone irriguée et en bordure de périmètres (à l'aide d'un GPS) ont été effectués dans et autour des zones de Niono et de Molodo. Avec l'éloignement des périmètres, la nappe affleurante sous les rizières, décroît rapidement. Malgré le faible nombre de villages (et donc de puits) en dehors de la zone irriguée, on constate que cette décroissance est relativement régulière, ce qui confirme la continuité hydraulique des différentes nappes.



Ligne isopiéze (altitude absolue) dans le Kala Inférieur, à partir de l'interpolation par krigeage (Winsurf 6.0) des hauteurs d'eau mesurées dans les puits de la zone (croix).

Figure 1.4 : Carte piézométrique du Kala Inférieur (Décembre 95)

Ce même travail a été effectué à la fin de la saison sèche (mai 96), donc en situation d'étiage. On a enregistré une décroissance des profondeurs d'eau des puits dans la zone irriguée pouvant aller jusqu'à 1 mètre. A l'extérieur de la zone, les profondeurs d'eau dans les puits sont sensiblement les mêmes. Ainsi, la carte piézométrique en mai 96 est pratiquement identique à celle de novembre 96. Cela peut s'expliquer par différentes raisons :

- Les apports d'eau d'irrigation à la nappe phréatique sont restés importants : en effet, le Fala et les principaux canaux sont toujours en eau pendant la contre-saison, et près de 5000 ha de riz ont été cultivés en double culture.
- La faible perméabilité du milieu tamponne les variations saisonnières de l'alimentation.

Cette carte permet d'estimer le gradient moyen de la nappe phréatique quand on s'éloigne des périmètres.

La nappe décroît avec un gradient perpendiculairement au Fala estimé à 40 mètres pour 20 km.

2.3. Evaluation de la transmissivité du niveau alluvial.

Afin de pouvoir calculer la fraction de lessivage permise par ce gradient, il faut évaluer les perméabilités des différents niveaux aquifères, ainsi que leur épaisseur, pour en déduire les transmissivités (produit de la perméabilité d'un niveau aquifère par son épaisseur).

Le modèle sectoriel de simulation du delta mort (PNUD, 1990) a permis d'établir une transmissivité moyenne pour le Continental terminal, égale à $5.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'aquifère alluvial a une profondeur moyenne de 8 mètres. Pour estimer sa perméabilité, des essais de pompage ont été tentés, mais la faible perméabilité du milieu n'a pas permis de les mener à bien. Des tests par choc hydraulique ou slug test (Bouwer and Rice, 1976; Petit et Vaubourg, 1982) ont été effectués sur des batteries de piézo mis en place sur quatre parcelles tests. Ces parcelles sont représentatives des différents types de sol rencontrés dans la zone. Les résultats sont consignés dans le tableau 1.

Tableau 1: Résultats des slugs tests pour quatre parcelles expérimentales (moyenne arithmétique).

Site	Perméabilité moyenne à 3 m (m/s)	Perméabilité moyenne à 1,5 m (m/s)	Unité morpho-pédologique
KL3	5.10^{-6}	8.10^{-6}	levée sableuse
N1	$1.7 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	petite levée limoneuse
N4	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$	petite levée limoneuse à cuvette argileuse
N9	$1.7 \cdot 10^{-6}$		cuvette argileuse

Dans le cas de la cuvette argileuse, on a implanté les piézomètres dans un horizon relativement plus perméable sous 3 mètres d'argile compact. On constate que les perméabilités sont très faibles (de l'ordre de 2.10^{-6} m/s). La levée sableuse (parcelle KL3) présente des valeurs de perméabilités plus importantes, allant jusqu'à 10^{-5} m/s .

Il est difficile de tirer une transmissivité moyenne de ces valeurs. Les levées sableuses vont favoriser la réalimentation rapide de la nappe phréatique quand elles sont situées au droit de canaux ou de rizières. On peut supposer que, comme pour l'aquifère du Continental Terminal, les lentilles sableuses sont sans continuité et interstratifiées dans des dépôts silto-argileux de perméabilité beaucoup plus faible. Si on considère un écoulement latéral hors des périmètres, l'influence de ces zones sableuses (représentant 18% de la surface des périmètres irrigués du Kala inférieur) sur la perméabilité moyenne sera faible. On évalue la perméabilité moyenne du niveau alluvial à 3.10^{-6} m/s, pour une épaisseur de 8 mètres.

La transmissivité moyenne du aquifère alluvial est donc de $2.4 \cdot 10^{-5}$ m/s, soit 20 fois moins que l'aquifère du Continental Terminal.

2.4. Fraction de lessivage permise par drainage naturel

L'eau amenée par l'irrigation (I) va se concentrer dans le profil de sol, sous l'effet de l'évaporation et de l'évapotranspiration. La concentration moyenne du profil à l'équilibre sera fonction de l'intensité du lessivage (ou drainage, D). Le facteur de concentration (Fc) est l'inverse de la fraction de lessivage (Fl), définie comme le rapport des quantités d'eau évacuées et apportées dans le système.

$$FL=\frac{1}{FC}=\frac{D}{I}$$

On a vu que la nappe s'abaisse quand on s'éloigne des périmètres irrigués (direction Est-Ouest) de 40 m sur une distance de 20 km, soit une pente de 2 pour mille. Dans la direction Nord-Sud, la pente de la nappe phréatique est la même que celle du sol, d'environ 2 mètre pour 100 km, soit une pente de 2 pour cent mille.

Les écoulements souterrains sont donc essentiellement dans la direction Est-Ouest.
Les débits sortant par drainage naturel seront calculés par l'application de la loi de Darcy

$$Q = S.K.i = T.i.L$$

Q le débit, S est la section verticale à travers laquelle on considère le flux, K la perméabilité, i le gradient, T la transmissivité, L la longueur de la section verticale.

On calcule le débit traversant les deux sections (à l'est et à l'ouest) parallèles au Fala en bordure des périmètres irrigués, comprenant les aquifères du Continental terminal et alluvial. On estime la longueur de cette section à 50 km. Les calculs sont détaillés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Calcul du débit évacué par drainage naturel.

	horizon alluvial	horizon continental
gradient i	0.002	0.002
transmissivité T (m2/s)	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Longueur de la section L (m)	50 000	50 000
Débit moyen (m3/s)	0.0048	0.1

La contribution de l'horizon alluvial est minime dans ce débit (5 %). Les imprécisions liées à l'estimation de sa transmissivité sont donc négligeables. On a vu que les variations de pendage de la nappe entre l'hivernage et la contre saison sont faibles.

On en déduit un volume total annuel (Q_{dn}) évacué par la nappe phréatique de $3.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Des données de débit moyen mensuel pour le Point A et le Point B sont disponibles au niveau de la gestion de l'eau des grands ouvrages (Markala). Le Point A est l'ouvrage de prise du canal du Sahel. Le point B est l'ouvrage régulateur du Fala de Molodo; les valeurs de débit au Point B transitent vers le Kouroumari. Une partie du débit entrant dans les périmètres irrigués du Kala Inférieur sera évacuée par le réseau de drainage à l'extérieur de la zone aménagée. Le débit irrigant les terres aménagées du Kala Inférieur vaut donc :

$$Q_{Kala} = Q_A - Q_B - \text{Pertes}_{A-B} - Q_{\text{drainé}}$$

On estime les pertes dans le Fala comprises entre 10 % et 30 % du débit délivré aux périmètres du Kala Inférieur;

On estime les quantités évacuées par le réseau de drainage, en première approximation¹, à 15 % du débit délivré. Le réseau de drainage ne permet que l'évacuation des eaux de surface excédentaires dont la concentration reste modérée. Nous considérerons que les sels sont évacués sous l'influence du drainage naturel et la quantité d'eau évacuée par le réseau de drainage a été soustraite de la quantité amenée par le réseau d'irrigation;

Le débit annuel considéré est la moyenne entre une année pluvieuse (1994) et une année sèche (1993). L'écart de ces deux valeurs à la moyenne est de $\pm 5.5 \%$.

Les calculs sont synthétisés dans le Tableau 3, pour différents niveaux de perte dans le fala.

Tableau 3 : Calcul de la fraction de lessivage

Pertes	Volume annuel (10^6 m^3)	Fraction de lessivage (Q_{dn} / Q_{kala})
10 %	850	1 / 270
20 %	750	1 / 230
30 %	660	1 / 200

Le drainage naturel dû au pendage de la nappe phréatique permet l'évacuation d'environ 1 / 230 des eaux amenées pour l'irrigation.

On a un ordre de grandeur du facteur de concentration moyen des eaux souterraines en situation d'équilibre. Cette tendance moyenne masque les évolutions locales conditionnées par la perméabilité du milieu (la concentration sera plus importante dans les sites de cuvette, plus faible dans les sites de levée).

¹Des mesures sont en cours pour boucler le bilan sur une année complète; les débits évacués par drainage et la concentration de cette eau sont nottamment suivis.

2.5. Conclusion

Les différentes nappes (alluvions - continental - grès) sont en continuité hydraulique. L'alimentation de la nappe par les eaux d'irrigation entraîne un bombement de la nappe au droit des périmètres irrigués. Le pendage vers l'extérieur des périmètres permet l'évacuation d'une certaine proportion des eaux amenées pour l'irrigation.

Les données de transmissivité disponibles permettent d'estimer en première approximation que 1/230 de l'eau amenée dans le profil du sol est évacuée par drainage naturel. L'aquifère du Continental Terminal assure 95 % de ce lessivage, l'aquifère alluvial étant peu épais et peu perméable.

3. Caractérisation des nappes phréatiques sous riziculture.

3.1. Les sites rizicoles.

Trois arroseurs cultivés en riziculture ont fait l'objet d'un suivi piézométrique débuté en mars 96. Ces arroseurs sont représentatifs des différents types de sol de l'Office et présentent des problèmes de dégradation plus ou moins localisés. Le suivi a débuté en mars 96 et doit se dérouler sur une année complète. **Les résultats présentés ici sont issus de l'analyse des données de mars 96 à juillet 96.**

KL3 : levée sableuse à sablo-limoneuse.

En surface, le taux de sable peut atteindre 60%. La quantité d'argile augmente avec la profondeur (L/A/S entre 1 m et 2 m), et à partir de 2 m le sable prédomine. La prospection géophysique a montré que sur ce site, les formations alluviales sont très peu épaisses (inférieures à 3 m). L'épaisseur du bloc continental varie de 6 m à 25 m.

La collecte des données s'est faite sur un réseau piézométrique installé au début de l'hivernage 89, toujours fonctionnel. 13 piézos ont été mis en place à une profondeur de 1,5 m suivant un transect partiteur - drain de partiteur et un transect arroseur - drain d'arroseur. La nature très sableuse du sous-sol n'a permis d'installer que 6 piézos en couple (3 m et 1,5 m). Des prélèvements de sol à différentes profondeurs ont été effectués au cours de l'installation de ces piézomètres; les valeurs de granulométrie proviennent de l'analyse de ces échantillons (Tréa et Kharbotty-Rhill, 1990).

Les superficies desservies par l'arroseur KL3 -7d n'ont pas été mises en culture au cours de la contre-saison, mais l'arroseur est resté en eau. En effet, en vue de favoriser la double culture lors de la C.S. 96, tout le réseau d'irrigation a été maintenu en eau au cours de cette contre-saison.

Des échantillons de sol ont été prélevés fin avril 96 suivant un maillage de 10 x 10 m sur des parcelles qui allait faire l'objet d'un bilan des eaux et des sels approfondis. Les mesures de pH effectuées sur des pâtes saturées (1/2,5) montrent que le pH est compris entre 5 et 6 sauf sur les points hauts où il est compris entre 8 et 9.

N4 : levée limono-sableuse à cuvette argileuse.

Les sols sont très hétérogènes; ils suivent la toposéquence suivante : levée sableuse dans la partie haute jusqu'à cuvettes argileuses dans la partie basse. En règle générale, le taux d'argile augmente de la surface jusqu'à 1,5 m. Un horizon limono-argileux à argileux compact est présent entre 0,5 et 1,5 m. Ensuite apparaît un horizon plus sableux.

Huit piézomètres ont été mis en place en 1989 suivant un transect partiteur-drain principal, complétés par quatre autres piézomètres (transect arroseur - drain d'arroseur). Ces piézomètres ont tous été installés en couple, à une profondeur de 1,5 m et 3 m. Comme au KL3, on dispose d'analyses d'échantillons prélevés à l'emplacement des piézomètres.

La quasi-totalité de cet arroseur a été cultivé pendant la contre-saison chaude 1996; il s'agit de la première année de mise en culture en contre-saison.

Sur cet arroseur, deux sites de levée limono-sableuse en position haute sont alcalins. Une amélioration de la maîtrise de l'eau (nouvelles diguettes) a permis de réduire significativement l'alcalinisation sur un de ces sites. Les sols limoneux à argileux ont des pH compris entre 6 et 7.

N9 : cuvette argileuse

Les trois premiers mètres ont une forte proportion d'argile, et sont très compacts. Des nodules calcaires et des gravillons ferrugineux peuvent être présents dans cet horizon argileux. A 3 m apparaît le sable, et à 3,5 m un horizon d'altérites (épaisse couche de gravillons ferrugineux) que la tarière ne peut traverser. En conséquence, les piézomètres ont été implantés en 1996 à 3,5 m, avant le niveau d'altérites.

Un transect (A) est parallèle aux arroseurs, du partiteur au drain de partiteur. Un autre transect (B), perpendiculaire à ce dernier, va d'un arroseur au drain principal en coupant un drain d'arroseur et un arroseur.

Avant le réaménagement, la salinité était telle que cette zone avait été abandonnée. D'épaisses croûtes de sel recouvraient le sol. Le réaménagement (datant de 1989) a permis une meilleure maîtrise de l'eau, à la fois par la réhabilitation des canaux et un planage du sol. Les parcelles les plus affectées ont pu être désalées grâce à des irrigation-vidange successives, puis remises en culture. Actuellement, cet arroseur est cultivé en double culture.

On ne dispose pas d'analyses de sol sur ce site. Néanmoins, les mesures obtenues avec les bougies poreuses implantées pendant l'hivernage entre 20 et 60 cm de profondeur donnent des pH de 9 et des CE de 4-5 mmhos : cela montre que l'alcalinisation-sodisation des sols est importante.

3.2. Le suivi piézométrique.

La crépine de ces piézomètres est longue de 0,5 m. Elle est entourée d'un tissu nylon. Un massif filtrant (sable et gravier) a été mis en place autour de cette crépine. Le tuyau est scellé avec du béton, ce qui permet d'éviter les écoulements préférentiels. Les piézomètres ont été calés par rapport à un repère topographique.

Les mesures suivantes ont été effectuées sur le terrain à un pas de temps hebdomadaire :

1. Hauteur
2. pH
3. CE
4. Alcalinité et pH labo (effectués au labo sur un échantillon prélevé tout les quinze jours)
5. Etat d'humidité des parcelles avoisinant les piézomètres (jugée de 0 à 3)

L'analyse des mesures d'alcalinité est effectuée dans la partie 4 (géochimie des nappes).

3.3. Analyse de la concentration de la nappe phréatique.

La conductivité électrique (μ mhos) est proportionnelle à la minéralisation de la nappe phréatique. Elle caractérise donc la concentration de la nappe.

Pour apprécier la concentration moyenne de la nappe, on dispose de mesures de la CE relativement constante au cours du temps. Dans le cas des sols sableux, après un apport d'eau faisant rapidement baisser la CE, celle-ci revient rapidement à une valeur d'équilibre. C'est cette valeur que l'on considèrera dans la suite.

Des slug tests permettent d'estimer la perméabilité à proximité du piézomètre. Ils ont été effectués sur tous les piézomètres, ceux implantés à 3 m et ceux implantés à 1,5 m. Pour les parcelles N4 et KL3, on dispose de la granulométrie aux sites d'implantation des piézomètres. On a tracé (fig. 3.1 et 3.2) l'évolution de la perméabilité en fonction du taux de sable aux deux profondeurs. En règle générale, la perméabilité augmente avec le taux de sable, ce qui confirme la validité de ces slug tests.

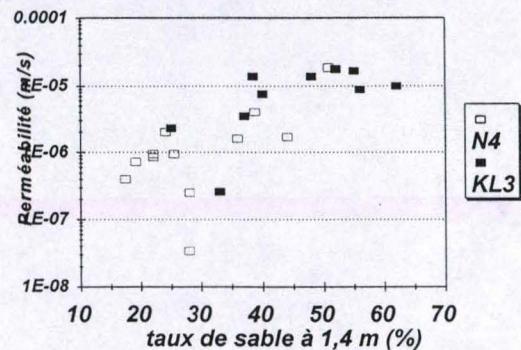


Figure 3.1: Relation sable perméabilité pour les piézos (1,5 m) du N4 et du KL3

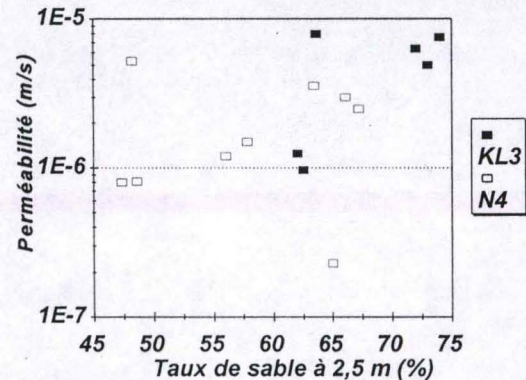


Figure 3.2 : Relation sable perméabilité pour les piézos (3m) du N4 et du KL3

On a représenté sur la figure 3.3 l'évolution de la CE en fonction de la perméabilité pour les piézomètres implantés à 1,5 m. On met en évidence une concentration de la nappe avec la diminution de la perméabilité du milieu. Pour certains piézos foncés à 1,5 m de la parcelle KL3, la perméabilité est trop forte pour que le slug test donne une mesure précise. L'eau remonte dans le piézo en quelques secondes, avant qu'on ait pu introduire la sonde. Ainsi beaucoup de mesures se groupent autour de $K = 10^{-5}$ m/s (fig. 3.1) qui est la limite de précision du slug test dans les conditions expérimentales. On remarque qu'à taux de sable égal, la perméabilité est beaucoup plus faible (un facteur de 10 environ) à 3 m qu'à 1,5 m.

La figure 3.4 représente la CE en fonction de la perméabilité à une profondeur de 3 mètres. Sur la parcelle KL3, la concentration de la nappe augmente si la perméabilité du milieu diminue, comme constatée pour la nappe superficielle.

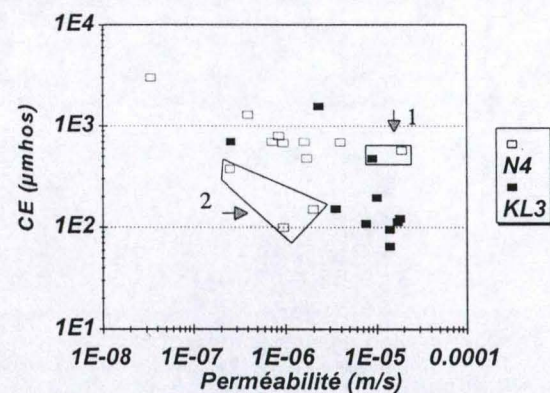


Figure 3.3: Relation CE-perméabilité pour les piézos (1,5 m) sur N4 et KL3

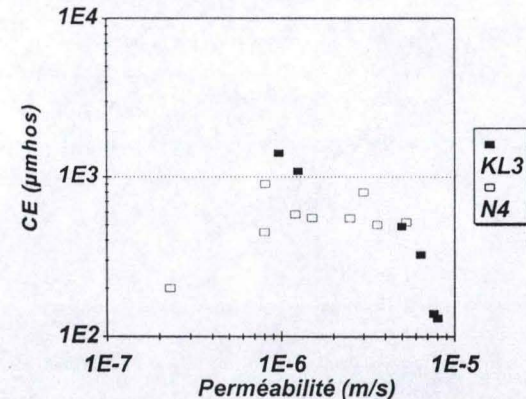


Figure 3.4 : Relation CE perméabilité pour les piézos (3 m) sur N4 et KL3.

En revanche, cette relation n'est plus vraie pour la parcelle N4, dans l'horizon sablo-limoneux sous-jacent à un horizon argileux compact.

La même représentation graphique (perméabilité-CE) est utilisée pour la parcelle N9, sur la figure 3.5. Aucune relation n'est mise en évidence entre la perméabilité du milieu et la concentration de la nappe phréatique de cet horizon aquifère sous-jacent à une épaisse couche d'argile.

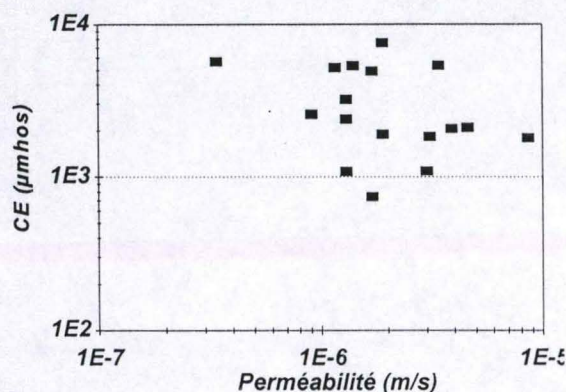


Figure 3.5: Relation CE perméabilité pour les piézos (3,5 m) du N9

Au vu de ces trois graphiques, deux types de fonctionnement apparaissent pour la nappe phréatique : la concentration de la nappe s'explique par la perméabilité du milieu, ou la concentration de la nappe dépend d'autres facteurs.

3.3.1. La concentration est liée à la perméabilité du milieu.

La dynamique de l'eau imposée par la culture de riz d'hivernage induit un certain lessivage des sels. Les résultats de la prospection morpho-pédologique du Kala Inférieur, portant sur trois horizons (0-20, 20-50, 50-100 cm) montre une élévation moyenne du pH avec la profondeur (Bertrand et al, 1993; Keita 1996), qui pourrait indiquer un processus de lessivage (Van Hoorn, 1992). Ce lessivage est limité par la remontée rapide de la nappe phréatique en position affleurante (Barral et al, 1996). Néanmoins, lors des préirrigations, et avant la remontée de la nappe, une percolation existe (BEAU, 1980).

Cette dynamique de lessivage imposée par la riziculture explique la relation entre la concentration du milieu et la perméabilité. La percolation des sels sous l'action de ce lessivage est conditionnée par la perméabilité du milieu.

- Dans les sols de levée sableuse (KL3), l'influence du lessivage est sensible jusqu'aux horizons profonds. La quantité de sels présents dans un horizon est contrôlée par la perméabilité de cet horizon.
- Dans les sols de petite levée (N4), le lessivage des sels est efficace jusqu'à un horizon argileux peu perméable entre 1 et 1,5 m de profondeur.
- Dans les cuvettes argileuses (N9), le sel est piégé. La dynamique de sels induites par les transferts verticaux n'est pas sensible dans les horizons sous-jacent à ce niveau argileux.

L'efficacité du lessivage induit par la riziculture va aussi dépendre de la maîtrise de l'eau. Sur la figure 3.3, les deux piézos désignés par la flèche 1 sont installés sur des levées sableuses, sur des points hauts où il est difficile de maintenir une lame d'eau. Les remontées capillaires sur ces deux points entraînent une augmentation de la concentration de la nappe phréatique. **Un lessivage déficient explique que ces deux points soient au dessus de la tendance moyenne.** Les trois piézos désignés par la flèche 2 sont alignés le long d'une rigole, situés en bout de l'arroseur N4, drainant les excès d'eau de l'arroseur vers le drain d'arroseur. Le long de cette rigole, en eau de façon permanente, une percolation importante pourrait avoir diminué les concentrations de la nappe phréatique. **Un lessivage plus important explique que ces trois points soient au dessous de la tendance moyenne.**

3.3.2. La concentration est liée à d'autres facteurs.

Sur les sites de petites levée limono-sableuses, ou de cuvettes argileuses, la concentration de la nappe profonde ne s'explique pas par la perméabilité du milieu. La présence d'un niveau argileux semble découpler la dynamique de la nappe sous-jacente des mouvements de solutés dans les horizons superficiels. Néanmoins, les gradients de concentration de cette nappe profonde sont très importants.

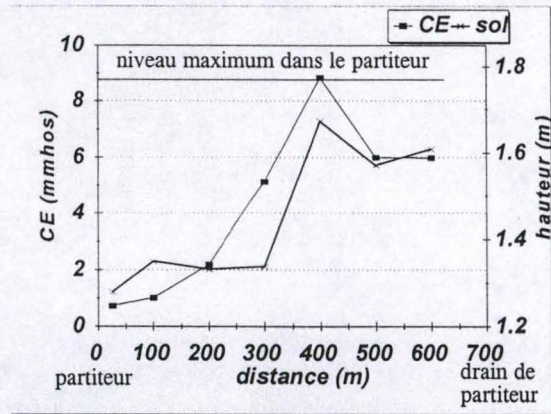


Figure 3.6 : Evolution de la CE de la nappe phréatique et de la topographie sur le transect A de la parcelle N9

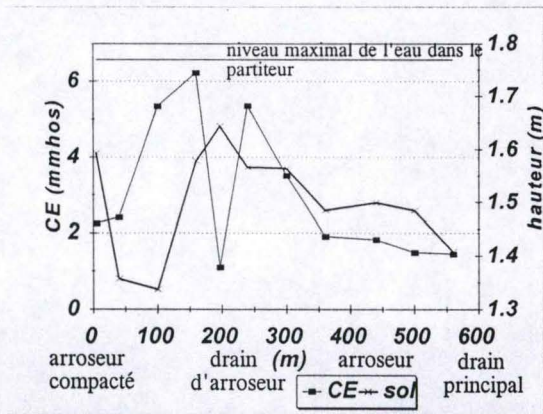


Figure 3.7 : Evolution de la CE de la nappe phréatique et de la topographie sur le transect B de la parcelle N9

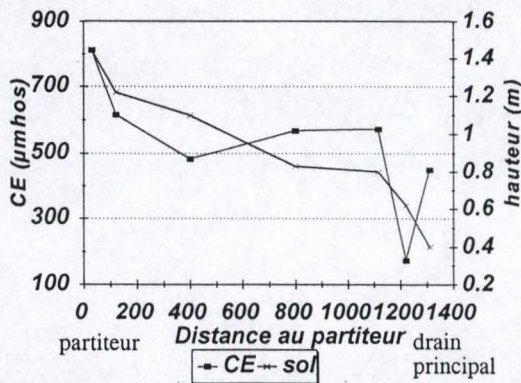


Figure 3.8 : Evolution de la CE de la nappe phréatique sur un transect partiteur - drain principal au N4.

Sur les figures 3.6 et 3.7, la concentration de la nappe au N9 est représentée selon les deux transects partiteur-drain de partiteur et arroseur-drain principal. On a aussi représenté la topographie du sol le long de ce transect. La même représentation a été effectuée pour l'arroseur N4, sur un transect partiteur - drain principal (figure 3.8)

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce gradient de concentration.

1. L'accumulation des sels dans le profil si la maîtrise de l'irrigation et le lessivage sont déficients sur les positions hautes. Cette concentration dans les horizons superficiels a une influence sur la concentration de la nappe phréatique.

2. La percolation au droit des canaux et des drains. Molle (1993) a montré que la nappe phréatique était influencée par les voies d'eau. Le rayon d'influence de ces voies d'eau dépend de la perméabilité du sol et de la différence de charge entre le canal et la nappe. Cette percolation est aussi sensible sur la concentration de la nappe, l'eau de canal ayant une CE de 50 μmhos , environ cent fois moins élevé que l'eau de la nappe.

3. Les mouvements latéraux de sels causés par le pendage de la nappe. Néanmoins, le pendage de la nappe (dépendant de la pente du terrain) et la perméabilité sont faibles, limitant ces flux latéraux.

La figure 3.6 (Transect A) montre une dilution de la nappe phréatique à proximité du partiteur, perceptible jusqu'à une distance de 300 m du partiteur. La topographie de la zone montre que l'arroseur est conçu à contre pente, et que la fin de l'arroseur, difficilement irrigable, coïncide avec des concentrations élevées. Il est difficile dans ce cas de faire la part des choses entre les hypothèses (1) et (2) pour expliquer ce gradient.

Le Transect B (figure 3.7) recoupe le transect A à 300 m du partiteur. Sur ce transect, de la gauche vers la droite, on voit l'influence sur la concentration de la nappe de l'arroseur compacté (0 et 20 m), du drain (100 m), de l'arroseur (400 m). La concentration de la nappe est faiblement corrélée avec la topographie de la zone dans ce cas. Sur la figure 3.8, on voit que la proximité du partiteur n'a pas d'influence sur la concentration de la nappe. Les fortes concentrations se trouvent à l'amont de l'arroseur, où les terres sont sodisées.

3.3. Dynamique de la nappe phréatique.

3.3.1. Influence de la mise en culture.

Deux parcelles (N4 et N9) ont été cultivées au cours de la contre-saison.

La comparaison des hauteurs d'eau mesurées au cours de la C.S. 91 et la C.S. 96 sur la parcelle N4 a été faite dans la figure 3.9. Elle montre l'influence de la mise en eau des rizières faite en saison chaude 96 pour la double culture. Les niveaux piézométriques sont à moins de 10 cm de la surface pour toute les parcelles cultivées, alors qu'à la même époque, en 91 (étiage), la nappe était en moyenne à 1m de profondeur. On remarque de plus que l'influence des irrigations sur la nappe phréatique se fait très peu sentir au delà des zones mises en culture, du fait de la faible perméabilité des sols (de cuvette argileuse à levée limoneuse sodisée).

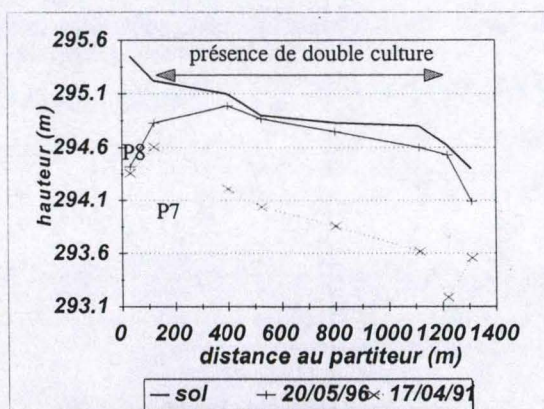


Figure 3.9: Comparaison des nappes phréatiques au cours de la contre saison 91 et 96 sur la parcelle N4

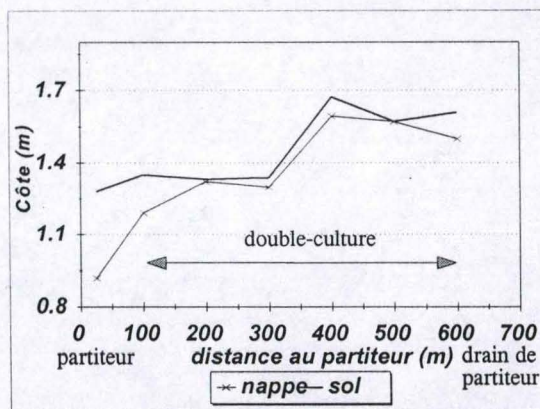


Figure 3.10: Profil de la nappe phréatique sur le transect A de la parcelle N9

La figure 3.10 représente le profil de la nappe phréatique au N9 au cours de la contre saison 96. Là encore, la nappe phréatique est subaffleurante du fait des irrigations. Les parcelles non cultivées, adjacentes aux parcelles en culture sont humides à cause des fuites à travers les diguettes et sont recouvertes d'efflorescences blanches et noires. En effet, la nappe phréatique sur ces parcelles non irriguées est proche de la surface et favorise les remontées capillaires.

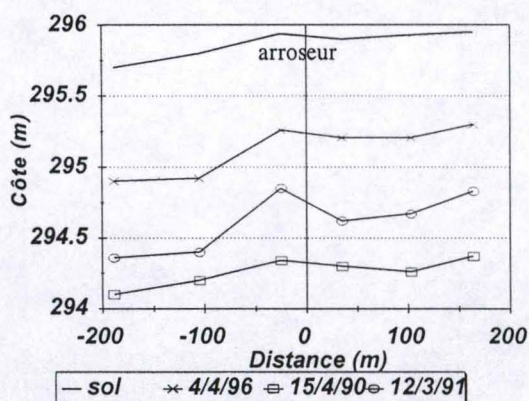


Figure 3.11: Profil de la nappe phréatique, perpendiculairement à l'arroiseur KL3 pour différentes années.

Les superficies desservies par l'arroiseur KL3 -7d n'ont pas été mises en culture au cours de la contre-saison, mais l'arroiseur est resté en eau. Le niveau minimal atteint par la nappe au cours de la C.S. 96 est environ 70 cm de la surface du sol (figure 3.11). Lors de la C.S. 90 et de la C.S. 91, le réseau tertiaire était asséché et on a atteint respectivement un niveau minimal de 1,5 m et 1,2 mètres². Des mesures de pH effectuées avant l'hivernage ont montré que seuls les points hauts avaient des pH élevés (8), la majorité des mesures donnant des pH de 5 à 6. La proximité de la nappe au cours de la contre-saison pourrait néanmoins favoriser les remontées capillaires et conduire à plus long terme à une dégradation des sols.

² La différence de niveau entre les années 90 et 91 pourrait s'expliquer par une faible mise en eau (fuites ?) De l'arroiseur pendant l'année 91.

La riziculture sur une partie des surfaces desservies par un arroseur favorise les remontées capillaires sur les terres qui ne sont pas mises en culture. La remontée de la nappe est sensible dans un rayon d'une centaine de mètres ou moins pour des sols argileux peu perméables. Le maintien en eau d'un arroseur dans une parcelle de levée sableuse conduit à une élévation du niveau de la nappe phréatique comprise entre 80 cm et 50 cm par rapport à une année sans eau, dans un rayon supérieur à 150 mètres.

3.3.2. Influence du réseau de drainage existant.

Les réseaux de drainage au niveau des parcelles KL3 et N9 n'étant pas fonctionnels ou inexistant, on a quantifié l'influence du drainage souterrain sur la nappe phréatique dans une situation 'optimale' qui est celle du N4. Cet arroseur présente une pente importante pour la zone, de 1 mètre pour 1300 . En bordure inférieure de l'arroseur, un drain principal fonctionnel est présent.

Le profil de la nappe à l'été (fig. 3.12, année 89-90) montre que le niveau de la nappe décroît parallèlement au niveau du sol. Deux exceptions à cela, le P8, foncé dans un sol très peu perméable et le P2. Le niveau plus élevé du piézomètre proche du drain (P1) montre que le niveau du piézo 2³ n'est pas influencé par le drain.

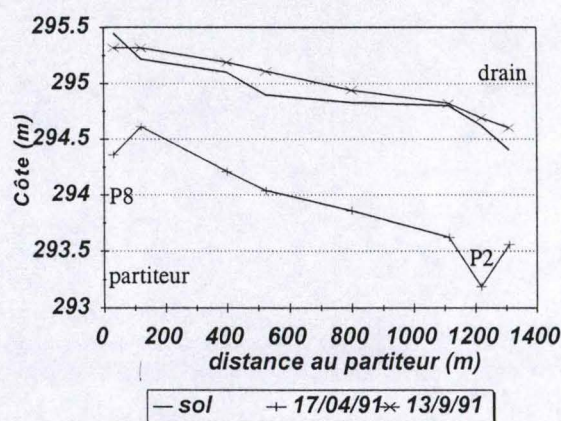


Figure 3.12: Profils de la nappe phréatique à l'été et pendant l'hivernage au N4

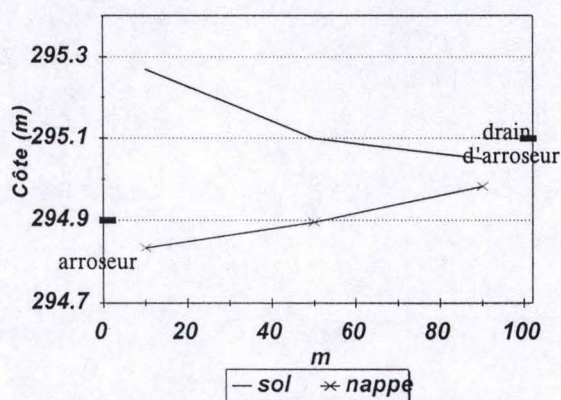


Figure 3.13: Profil de la nappe phréatique sur un transect arroseur-drain d'arroseur au N4

Le drain principal, distant de 30 m du piézo P1, n'a donc aucune influence sur la nappe phréatique (l'évolution du P1 est similaire aux autres piézomètres). Plusieurs raisons à cela ;

1. la perméabilité est faible,
2. le niveau du drain est élevé quand le niveau de la nappe est élevé
3. A l'été, la nappe est aussi basse que le drain.

La figure 3.13 montre le niveau moyen de la nappe phréatique au cours de la contre-saison chaude 96 par rapport au niveau du sol sur un transect arroseur-drain d'arroseur. A proximité de l'arroseur, une position haute sableuse difficilement irrigable; à proximité du drain d'arroseur, une cuvette argileuse facilement irrigable. Les niveaux moyens des arroseurs et drains d'arroseurs

³ Ce point bas s'explique par une épaisseur importante (2 m) d'argile verticale à ce niveau. Les fentes de retrait permettent à l'évaporation d'abaisser plus profondément la nappe, sans qu'elle soit influencée par la nappe sous-jacente.

sont indiqués. Il faut fermer le régulateur de l'arroseur pour permettre l'irrigation (difficile) de la levée sableuse, qui présente des phénomènes de sodisation. Le drain d'arroseur, encombré par la végétation et creusé à une vingtaine de centimètres est engorgé pendant toute la saison des irrigations. La comparaison de son niveau moyen avec le niveau de la nappe montre qu'il permet uniquement une évacuation des eaux superficielles (excès des rigoles quaternaires, vidange des parcelles).

Le réseau de drainage ne permet qu'une évacuation des eaux superficielles et n'a aucune influence sur la dynamique de la nappe phréatique.

3.4. Conclusion

Dans les sols sableux à limoneux, le drainage interne est relativement bon. Les nappes sont peu concentrées. **L'apparition d'efflorescence et de pH élevés sur les sols de levée en riziculture** est imputable à une position haute. En effet, la percolation est limitée et les remontées capillaires au cours de l'hivernage sont importantes, la nappe étant subaffleurante. Les sels s'accumulent sur cette butte. Un changement de régime hydrique (confection de nouvelles diguettes, planage) peut facilement diminuer la salinité en permettant la percolation.

Dans les sols limoneux à argileux (cas du N9 et du N4), les perméabilités plus faibles causent une augmentation des concentrations de l'eau du sol et de la nappe phréatique. Le riz pourra toutefois être cultivé, surtout si le site est facilement submersible. L'eau du Niger faiblement concentrée assurera un lessivage superficiel.

La culture du riz en contre-saison favorise la dégradation des parcelles proches non irriguées. Cette salinisation sera sensible sur un faible rayon pour les sols peu perméables. Dans les sols plus perméables, la culture du riz d'hivernage lessivera facilement les sels qui auraient pu s'accumuler en surface.

Le réseau de drainage ne permet pas d'évacuer les sels présents dans le profil du sol. Une amélioration du drainage existant aurait des effets limités car :

- La percolation de l'eau d'irrigation sous riziculture permet d'assurer un lessivage suffisant dans les sols de levée.
- Un drainage efficace des sols de cuvette peu perméable nécessiterait un faible écartement des drains, incompatible avec le réseau existant.

4. Géochimie des nappes

Différentes sources d'informations ont été utilisées:

- Les données de la DNHE (Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie) concernant la conductivité électrique des forages de la zone et l'analyse de la composition minérale d'une partie d'entre eux;
- Les travaux de N'Diaye (1987) et Vallès *et al.* (1988) sur les mécanismes géochimiques mis en jeu;
- Les données de composition minérale des eaux d'irrigation et de la nappe phréatique au sein des secteurs irrigués; elles sont issues des travaux de N'Diaye (1987), Van Diepen (1984), Winja et Bruggenwert (1994) complétées par des analyses récentes du PSI;
- La nature des efflorescences observées localement en surface des secteurs irrigués et analysés par le centre de sédimentologie et de géochimie de surface du CNRS (N'diaye, 1987) et récemment par le laboratoire des sols ORSTOM de Dakar.

Après un rappel des concepts théoriques utilisés, seront successivement abordés la géochimie de la nappe régionale du continental terminal, puis la géochimie de la nappe alluviale au sein des secteurs irrigués.

4.1. Rappel théorique sur les mécanismes géochimiques et le concept d'alcalinité résiduelle

Lors de la concentration des eaux, des minéraux sont susceptibles de précipiter ce qui modifie la composition des solutions. Les précipitats les plus communs sont: la calcite, la silice amorphe, le gypse et les minéraux argileux contribuant principalement au contrôle du magnésium (Appelo et Postma, 1995). A l'office du Niger, N'Diaye (1987) et Vallès *et al.* (1989) ont mis en évidence que les solutions étaient contrôlées par la précipitation de calcite et d'une argile magnésienne proche de la sépiolite. Aucune précipitation de gypse n'a été mise en évidence.

Lorsque la solution se concentre, la calcite et la sépiolite précipitent successivement, contribuant au contrôle de l'alcalinité et des molalités en calcium et magnésium qui ne peuvent augmenter simultanément. Si la somme des équivalents de calcium et magnésium est supérieure à l'alcalinité dans la solution de départ, l'alcalinité décroît et les molalités en calcium et magnésium augmentent à un rythme inférieur à celui du facteur de concentration. Dans une situation inverse, l'alcalinité augmente et les molalités en calcium et magnésium diminuent. Ce concept d'alcalinité résiduelle (Van Beek et Van Breemen, 1973; Droubi, 1976) permet de prévoir l'évolution de la composition chimique d'une solution lorsqu'elle se concentre; elle est calculée en soustrayant à l'alcalinité les équivalents de cations et en additionnant les équivalents d'anions qui sont impliqués dans les précipitations.

La composition des solutions est non seulement contrôlée par la précipitations de minéraux mais aussi dans l'échange de cations (Na, Ca, Mg,...) avec le complexe d'échange cationique. Ces conditions d'équilibre n'étant pas encore définies pour les sols de l'office du Niger, nous avons donc retenu les isothermes d'échange définis pour les sols du Pakistan (Marlet, 1996). Le mélange ou la concentration de solutions ont été simulés avec différents modèles dérivés du modèle thermodynamique GYPSOL (Vallès et Bourgeat, 1988) qui prend en compte la spéciation des espèces majeurs, la précipitation ou dissolution des minéraux et les échanges cationiques. Dans ces modèles, nous avons considéré que la solution du sol était en équilibre avec la kaolinite et la silice amorphe et autorisé la précipitation d'illite qui contribue au contrôle du potassium.

A l'Office du Niger, l'alcalinité résiduelle de l'eau d'irrigation est positive. Sa concentration a été simulée; les résultats sont présentés dans le figure 4.1. Après une première phase de concentration de la solution du sol, la calcite et la sépiolite précipitent successivement. On constate alors que les molalités en calcium et magnésium diminuent tandis que l'alcalinité continue d'augmenter à un rythme inférieur à celui du facteur de concentration. Ces évolutions sont symptomatiques d'un processus d'alcalinisation des sols. La diminution des molalités en calcium et magnésium favorise une adosption rapide du sodium sur le complexe d'échange cationique

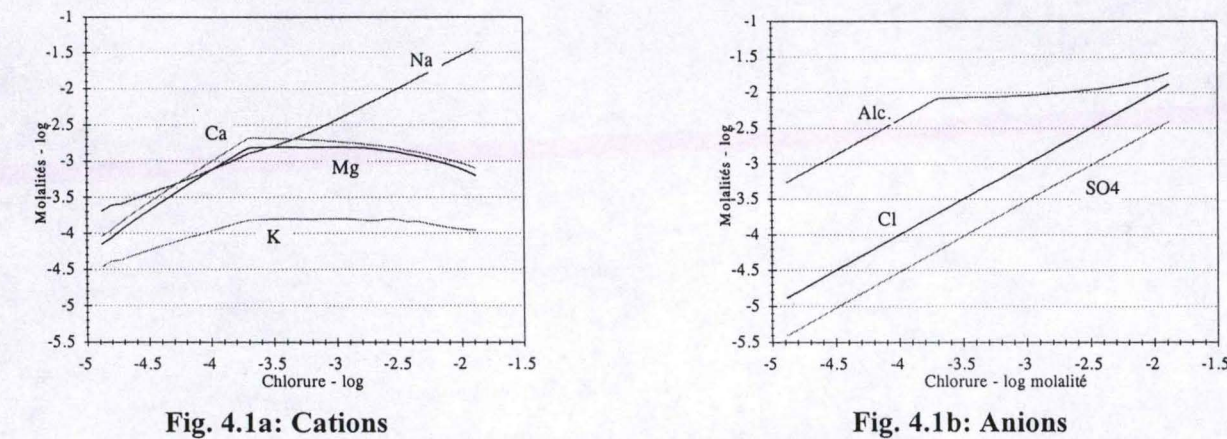


Figure 4.1: Simulation de la concentration des eaux d'irrigation (CEC=100 meq/kg; $pCO_2=10^{-2}$)

4.2. Etude de la nappe régionale du continentale terminal

4.2.1. Variabilité spatiale de la conductivité électrique

Le delta central nigérien est une vaste plaine alluviale bordée au Sud et à l'est par le fleuve Niger et à l'ouest par le marigot (Fala) de molodo, ancien défluent tari du Niger qui coulait autrefois en direction Sud-Nord (Dabin, 1951). Ce défluent a été remis en eau par le Canal du Sahel et assure l'alimentation des périmètres du Kala inférieur et du Kouroumari. Ces alluvions reposent sur les dépôts sédimentaires du continental terminal qui affleurent à l'ouest du fala de Molodo.

Les valeurs de conductivité électrique de 342 forages géoréférencés ont été représentées sur une zone comprise entre 13.5° et 14.8° de latitude Nord et 5.5° et 6.8° de longitude ouest (figure 4.2). La cartographie de la conductivité électrique de la nappe du continental terminal montre que les matériaux originels situés à l'extérieur du delta central sont salés. Leur conductivité électrique varie de 1dS/m à 6.5 dS/m (valeur maximale observée sur un forage du village de Ndoфинana). Dans le delta central, la nappe n'est pas salée et les valeurs de conductivité électrique sont le plus souvent inférieures à 0.3 dS/m. Le fonctionnement hydrologique de la zone sous l'influence des divagations du fleuve Niger, basculant progressivement de l'ouest vers l'est de la zone, a contribué à lessiver les formations du continental terminal. Plus à l'ouest, les grés sous-jacents affleurent et la conductivité électrique des aquifères décroît. Au Sud-Ouest de la zone, la diminution plus marquée de la conductivité électrique doit être reliée à un bombement du substratum gréseux (figure 1.1).

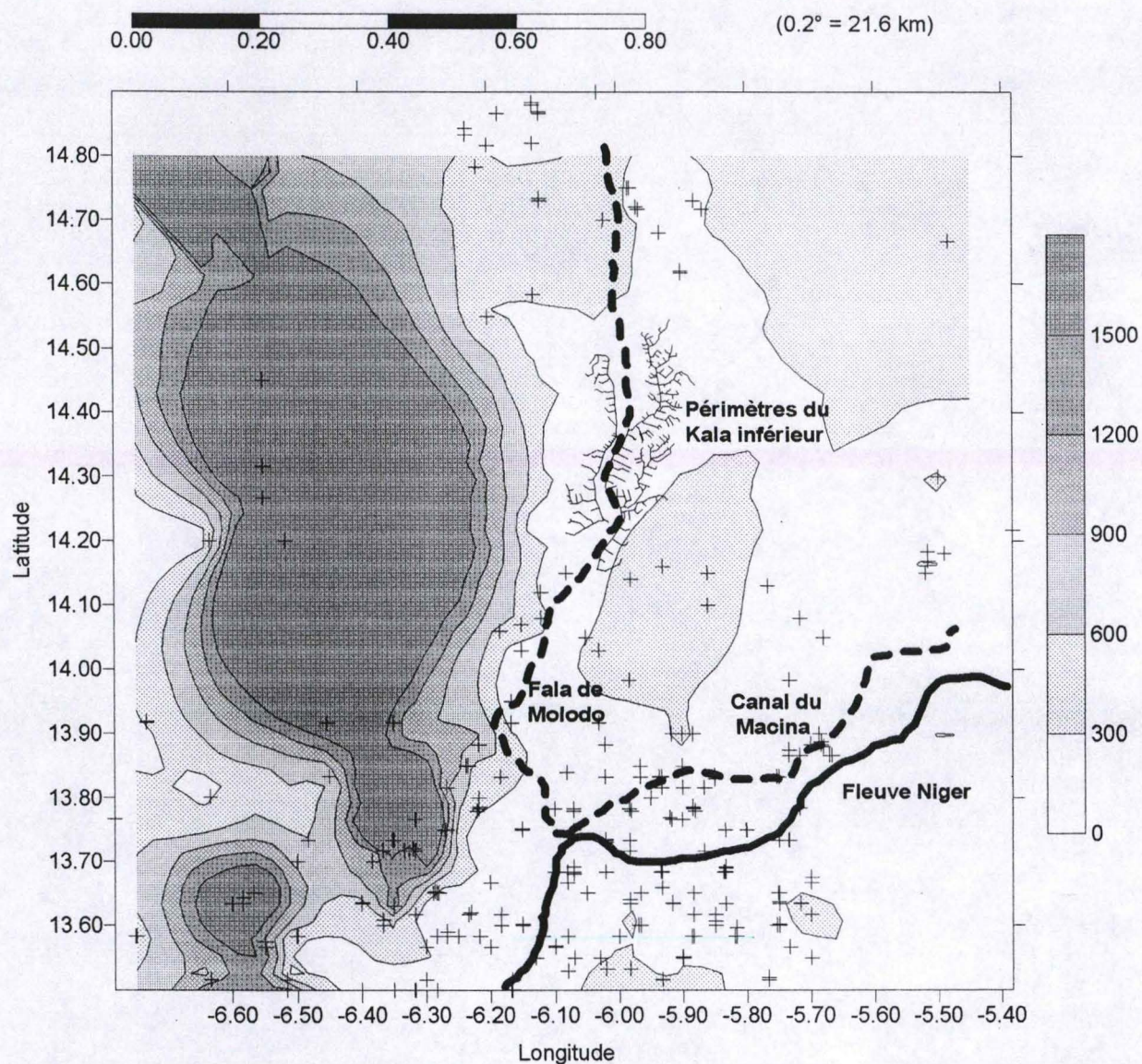


Figure 4.2. Cartographie de la conductivité électrique de la nappe du continental terminal (données DNHE)

4.2.2. Géochimie de la nappe du continental terminal

Les analyses de la composition chimique des eaux de forages réalisés par la DNHE ont été représentées en fonction de la molalité en chlorure, utilisés comme traceur (fig 4.3). Les analyses chimiques de la DNHE sont présentés en annexe ...

Avec l'augmentation de la concentration de la nappe, on observe:

- une augmentation de la molalité en sodium à un rythme légèrement inférieur à celui du facteur de concentration;
- une augmentation des molalités en calcium et magnésium à un rythme inférieur à celui du facteur de concentration. Cette augmentation tend à se stabiliser pour les solutions les plus concentrées;

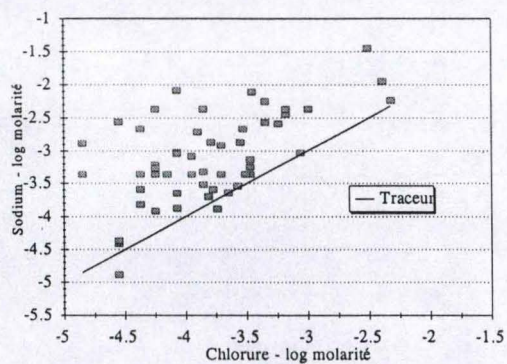


Figure 2a: Sodium

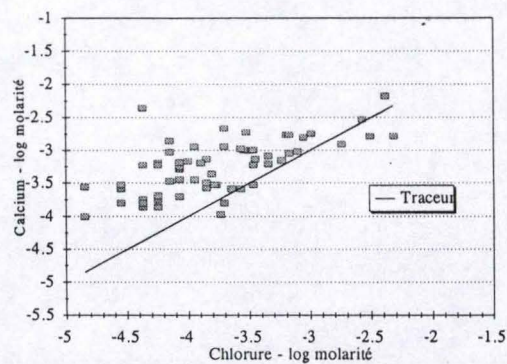


Figure 2b: Calcium

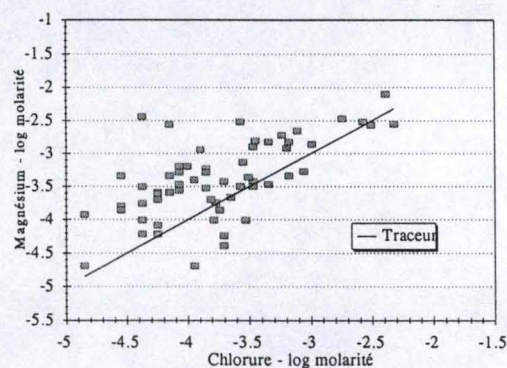


Figure 2c: Magnésium

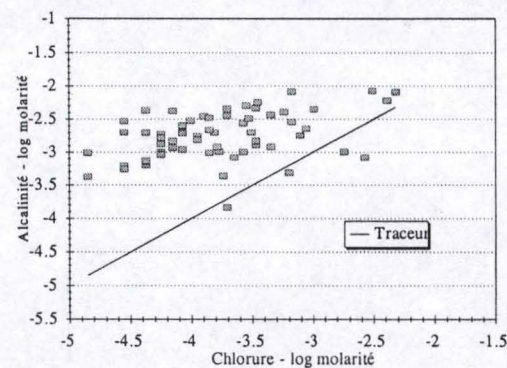


Figure 2d: Alcalinité

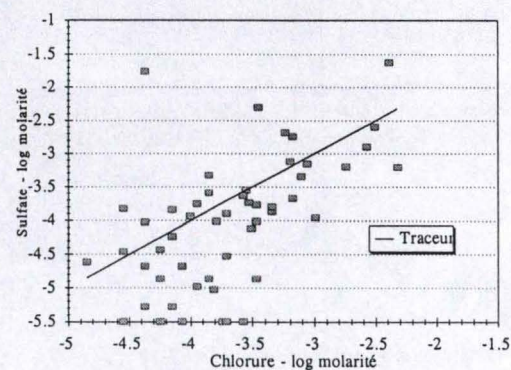


Figure 2e: Sulfate

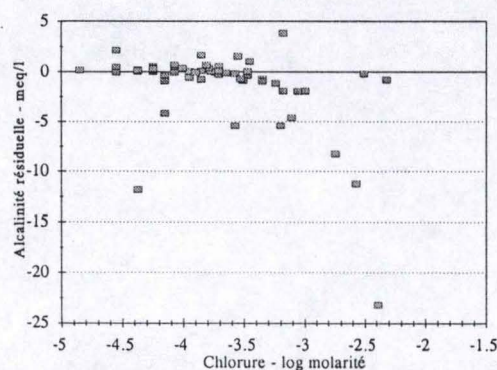


Figure 2f: Alcalinité résiduelle

Figure 4.3: Evolution de la composition de la nappe du continental terminal: Diagramme de concentration

- une augmentation de l'alcalinité à un rythme inférieur à celui du facteur de concentration;
- une augmentation de la molalité en sulfate à un rythme supérieur à celui du facteur de concentration. Le ratio SO_4/Cl est plus élevé pour les solutions les plus concentrées;
- une diminution importante de l'alcalinité résiduelle: légèrement positive pour les solutions les moins concentrées, elle devient fortement négative pour les solutions les plus concentrées.

Ces évolutions, caractérisées notamment par une augmentation continue des molalités en calcium et magnésium, ne sont pas conformes aux résultats attendus d'une concentration progressive des eaux du fleuve Niger caractérisées par une alcalinité résiduelle positive (fig.4.1). En fonction des analyses réalisées par la DNHE, les eaux de la nappe du continental terminal ne dériveraient pas d'une concentration des eaux du fleuve Niger.

Afin de rendre compte de ces évolutions, nous avons simulé les conséquences d'un mélange progressif des eaux de nappe les plus concentrées avec une quantité croissante d'eau du fleuve Niger (fig.4.4).

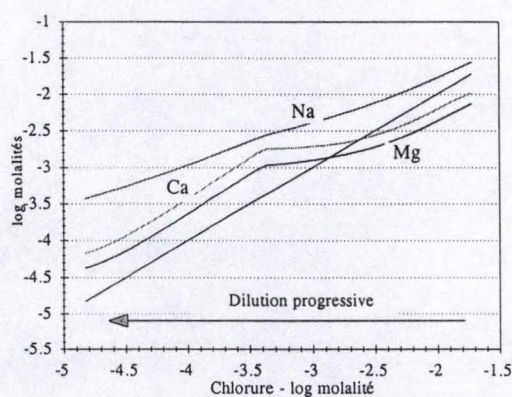


Figure 4.4a: Cations

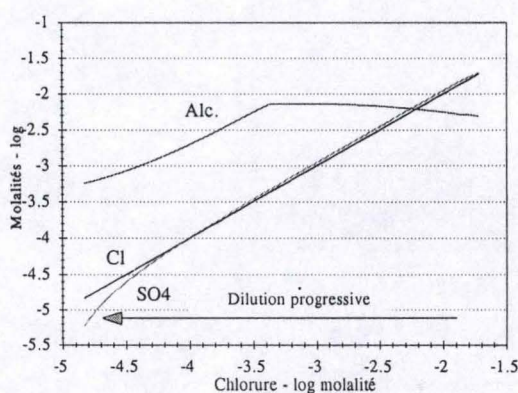


Figure 4.4b: Anions

Figure 4.4: Simulation de la dilution progressive de la nappe du continental terminal par les eaux du Niger ($\text{CEC}=30 \text{ meq/kg}$; $\text{pCO}_2=10^{-2}$; Stock calcite= 44 mmoles/kg ; stock sépiolite= 2.5 mmoles/kg)

Ainsi, lors de la dilution progressive des eaux de nappe salées par les eaux douces du fleuve Niger, on observe:

- une diminution de la molalité en sodium plus lente que celle du facteur de concentration due à une désorption progressive du sodium du complexe d'échange;
- une diminution tout d'abord lente des molalités en calcium et magnésium liée à une dissolution progressive de calcite et de sépiolite qui compense les effets de la dilution et leur adsorption progressive sur le complexe d'échange;
- une augmentation très lente de l'alcalinité liée à la dissolution de calcite et sépiolite qui compense les effets de la dilution;
- une diminution de la molalité en sulfate plus rapide que celle du facteur de concentration, lié aux effets d'une dilution avec une solution moins riche en sulfate que la solution originelle.

La composition de la nappe du continental terminal ne semble pouvoir s'expliquer que par la dilution progressive d'une eau originellement salée par les eaux plus douces du fleuve Niger. Cette hypothèse est cohérente avec la représentation spatiale de la salinité de cette nappe qui aurait été progressivement lessivée dans la zone du delta intérieur. Les solutions les plus concentrées sont caractérisées par une alcalinité résiduelle négative et une

proportion de sulfate supérieure à la composition des eaux du fleuve Niger.

4.3. Géochimie de la nappe alluviale

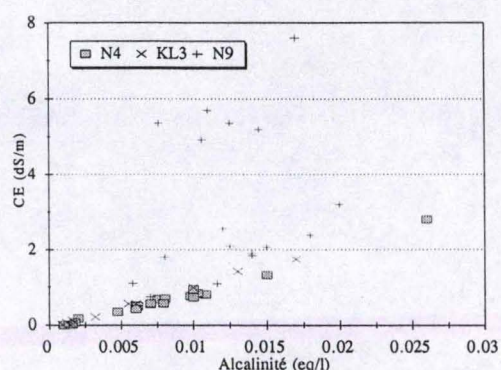


Figure 4.5: Relation entre l'alcalinité et la conductivité électrique (N4, N9 et KL3)

Les eaux de nappe ont été suivies pendant l'année 1996 le long de 3 transects piézométriques installés au sein des arroseurs N4, N9 et KL3. Les mesures de conductivité électrique et d'alcalinité ont été représentées dans la figure 4.5. Sur les arroseurs N4 et KL3, l'alcalinité et la conductivité électrique augmentent conjointement; le rythme d'augmentation de l'alcalinité décroît progressivement indiquant l'existence d'un contrôle de l'alcalinité qui a un comportement d'ion majoritaire conformément au concept d'alcalinité résiduelle. Ces évolutions sont conformes aux résultats attendus d'une concentration progressive des eaux d'irrigation. Les eaux de nappe de l'arroseur N9 sont caractérisées par une conductivité électrique beaucoup plus élevée qui

n'apparaît pas corrélée à l'alcalinité. Ce comportement pourrait indiquer l'existence d'une autre source de minéralisation plus riche en chlorure et sulfate que les eaux d'irrigation.

Cet analyse a été poursuivie par l'étude de la composition minérale des eaux de nappe et d'eau d'irrigation qui ont été représentées en fonction de la molalité en chlorure utilisée comme traceur (figure 4.6). A l'exception de 3 piézomètres d'où sont extraites des solutions parmi les plus concentrées, l'eau de nappe et l'eau d'irrigation sont caractérisées par une alcalinité résiduelle positive. En fonction du concept d'alcalinité résiduelle, leur concentration doit conduire à une augmentation de l'alcalinité et une diminution des molalités en calcium et magnésium dès lors que la calcite et la sépiolite précipite. Or, bien que les solutions soient en équilibre avec la calcite et la sépiolite, l'évolution des molalités n'est pas conforme aux évolutions attendues. **La qualité des eaux de nappe ne provient pas de la seule concentration progressive des eaux d'irrigation.** Au sein de ces prélèvements, nous avons isolé deux groupes de piézomètres qui se distinguent par leurs proportions respectives en chlorure et sulfate:

1. Le premier groupe à un rapport chlorure/sulfate proche de 1; les analyses correspondantes ont été représentées à l'aide d'une croix. Au sein de ce groupe, l'évolution des molalités est de même nature que celle décrite précédemment pour la géochimie des eaux de nappe du continental terminal. L'évolution de leur faciès géochimique indique que **leur origine doit vraisemblablement être liée aux eaux de nappe plus profonde du continental terminal, issues d'une dilution progressive de solutions salées.**

2. Le second groupe est caractérisé par un rapport chlorure/sulfate proche de 2, comparable au faciès chimique des eaux d'irrigation. Au début du processus de concentration, les molalités en calcium et magnésium augmentent à une vitesse comparable à celle du traceur. Lorsque la calcite et la sépiolite précipite, l'alcalinité et l'alcalinité résiduelle continuent d'augmenter tandis que les molalités en calcium et magnésium décroissent. Dans le même temps, la molalité en sodium augmente à un rythme inférieur à celle du facteur de concentration due à son adsorption sur le complexe d'échange. Ces évolutions sont conformes à la concentration d'une eau à alcalinité résiduelle positive. **Leur origine doit être attribué à la concentration des eaux d'irrigation.**

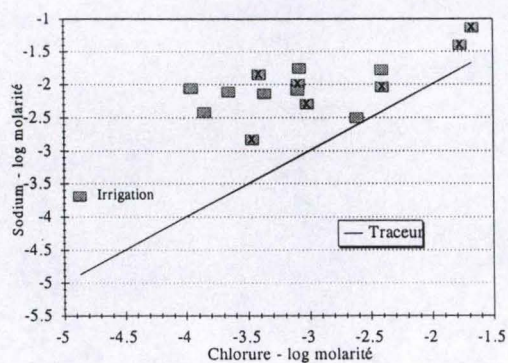


Figure 4.6a: Sodium

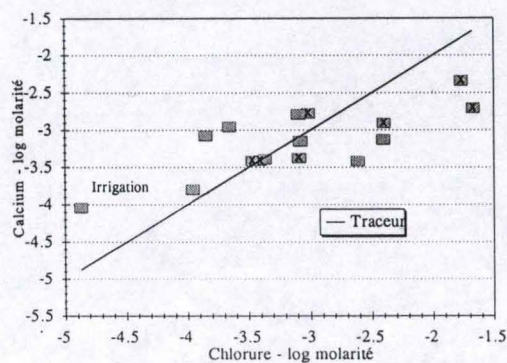


Figure 4.6b: Calcium

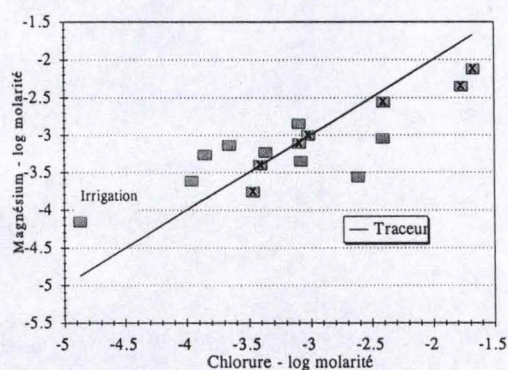


Figure 4.6c: Magnésium

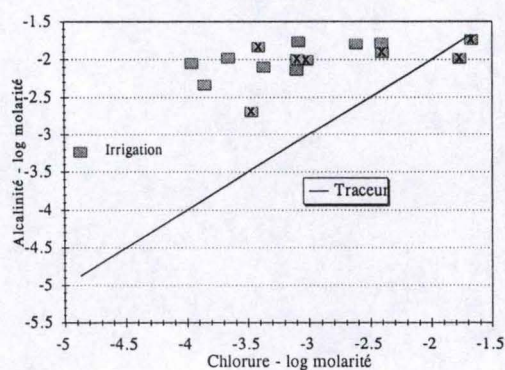


Figure 4.6d: Alcalinité

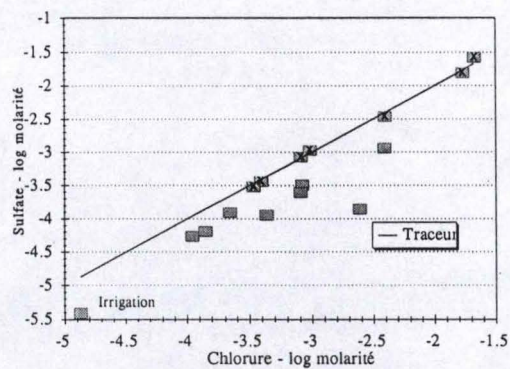


Figure 4.6e: Sulfate

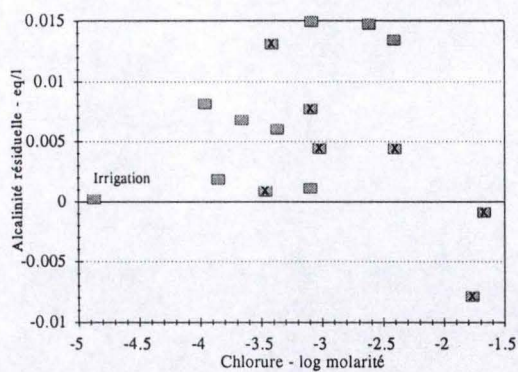


Figure 4.6f: Alcalinité résiduelle

Figure 4.6. Evolution de la qualité des eaux de nappe alluviale: diagramme de concentration

Ces deux sources de minéralisation différentes sont susceptibles d'expliquer la nature différente des salants qui peuvent être observés en différents endroits des secteurs irrigués:

- Les salants noirs sont composés de silice, de halite (NaCl) et de Trona (NaHCO_3 , Na_2CO_3 , $2\text{H}_2\text{O}$). Ce sont les produits attendus du processus d'alcalinisation due à la concentration d'une eau à alcalinité résiduelle positive;
- Les salants blancs ne contiennent pas de carbonates. Ils sont composés en proportion variables de thénardite (Na_2SO_4) ou de mirabillite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), de silice, de Bloedite (Na_2SO_4 , MgSO_4 , $4\text{H}_2\text{O}$), de glauberite ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$), de gypse (CaSO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$) et de halite. Ces sels sont la résultante d'un processus de salinisation neutre et ne peuvent être issue de la seule concentration des eaux d'irrigation. Ils pourraient localement témoigner de l'existence d'une salure primaire du paysage.

4.4. Proposition d'un modèle explicatif de la géochimie des nappes de l'Office du Niger

L'hypothèse de l'existence d'une salure primaire non issue de la concentration des eaux du fleuve Niger est un constat nouveau qu'aucune des différentes études menées sur la zone n'avait mis en évidence. Toutefois, Bertrand (1986) émettait l'hypothèse que la nappe, au cours de sa remontée, s'est chargée en sodium par contact avec des lentilles sodiques formées au cours des périodes arides du quaternaire récent. Cela doit nous inciter à la plus grande prudence vis à vis de ces observations qui devront être confirmées par des études complémentaires. Ceci dit, les informations recueillies sont suffisamment cohérentes pour que nous puissions tenter d'expliquer l'origine de ce phénomène.

Les sédiments du continental terminal se sont déposés en conditions salines. Les traces de cette salure sont encore très présentes dans la zone ouest située à l'extérieur du delta intérieur et marque le faciès géochimique des eaux de nappe dans le delta intérieur. On peut postuler que le fala de Molodo, lorsque le delta mort était fonctionnel, ait contribué à la remontée de la nappe, mobilisant les sels contenus dans les matériaux sous-jacents qui ont pu localement se concentrer (on observe de nombreux nodules calcaires de taille centimétrique dont la présence ne peut s'expliquer que par une évaporation intense et une forte concentration des solutions); ou rester piégés dans les alluvions les moins perméables (il est remarquable de constater que, parmi les piézomètres étudiés, seuls ceux situés sur des zones de cuvette semblent être affectés par cette salure primaire). La période climatique plus humide ayant précédé la période actuelle d'aridisation a vraisemblablement conduit au lessivage des horizons superficiels; les prospections pédologiques réalisées lors de l'aménagement de la zone n'ont permis de localiser aucune salure dans les horizons superficiels dont le pH était généralement acide. Suite à la mise en valeur de la zone sous irrigation, la nappe est remontée de 40 mètres de profondeur jusqu'à la surface, mobilisant de nouveau les sels piégés dans les matériaux alluviaux sous-jacents. Ce sont ces sels que nous retrouvons aujourd'hui localement dans les nappes superficielles ou qui ont pu conduire à l'apparition de salants blancs dans les zones où le lessivage et le drainage sont déficients.

4.5. Evolution prévisionnelle de la dégradation

Nous ne sommes pas en mesure de décrire de façon précise les évolutions en cours en raison de la complexité du fonctionnement hydrologique des sols sous l'influence de l'irrigation, d'une part, et de l'hétérogénéité des caractéristiques du milieu (état initial, capacité d'échange cationique,...), d'autre part. Néanmoins, il est important de préciser les caractéristiques d'un

scénario moyen attendu sous l'éclairage des résultats acquis en ce qui concerne les mécanismes hydrologiques et géochimiques.

Nous avons donc simulé l'évolution attendue des caractéristiques chimiques des eaux pendant une période de 200 ans de culture sous irrigation en supposant que le régime hydrologique des sols est contrôlé: par les apports en eau d'irrigation, estimés à environ 2000 mm/an, d'une part, et par le drainage naturel de la nappe, c'est à dire un facteur de concentration de 230 (ou une fraction de lessivage de 0.0043) correspondant à la valeur moyenne mise en évidence par l'étude hydrogéologique.

Dans la simulation, nous avons par ailleurs considéré les paramètres suivants:

- une composition chimique initiale de la solution de sol identique à celle de l'eau d'irrigation; une capacité d'échange cationique (CEC) de 100 meq/kg de sol, caractérisant un sol de texture médiane sablo-argileuse et une composition du complexe d'échange en équilibre avec la solution du sol;
- un volume de sol évoluant de façon homogène de la surface du sol jusqu'à la profondeur maximale de la nappe; le stock hydrique correspondant a été défini égale à 500 mm (porosité de 40% et profondeur maximale de la nappe de 1.25 m);
- une pCO_2 de 10^{-2} atm.

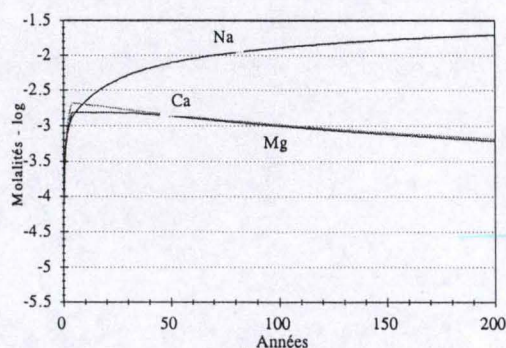


Figure 4.7a. Cations

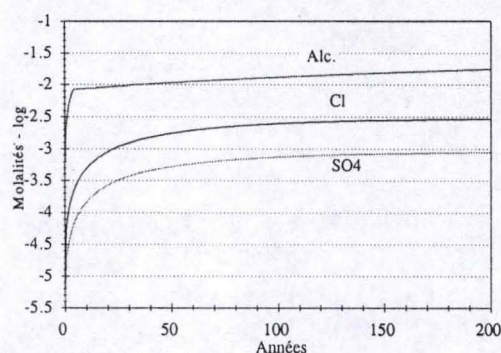


Figure 4.7b. Anions

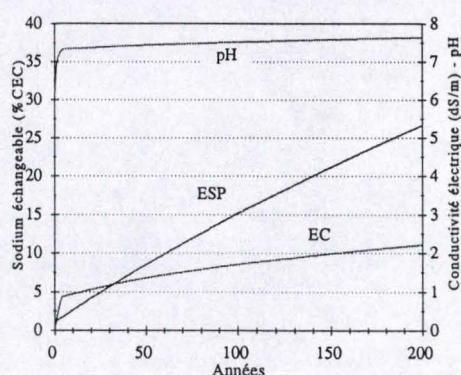


Figure 4.7c. pH insitu, conductivité électrique et sodium échangeable

Figure 4.7. Simulation de la concentration des eaux d'irrigation: évolution prévisionnelle

La calcite et la sépiolite précipite rapidement après seulement quelques années de culture sous irrigation. Avec l'augmentation de la concentration de la solution du sol (risque de salinisation), on observe une augmentation régulière de l'alcalinité (risque d'alcalinisation) et une

décroissance des molalités en calcium et magnésium, conformément au concept d'alcalinité résiduelle; ces conditions facilitent l'adsorption de sodium sur la complexe d'échange (risque de sodisation). Mais ces différents risques ne se présentent pas le même caractère de gravité:

- L'augmentation de la salure est modérée. En l'état des connaissances, la concentration parfois très élevée de la nappe (de 3 à 7 dS/m) ne semble pouvoir s'expliquer que par une salinisation héritée comme le confirme l'étude géochimique des eaux de nappe. Néanmoins, il faut s'attendre à très long terme à une salinisation progressive des périmètres si les conditions de drainage ne sont pas améliorées.
- L'augmentation de l'alcalinité et du pH est lente. Néanmoins, les conditions d'alimentation minérale des cultures pourraient être affectées à partir d'un pH *in situ* proche de 7.5 comme cela a été démontré sur certains périmètres irrigués du Niger (Marlet, 1996). De telles valeurs pourraient être atteintes dans un proche avenir sur les secteurs les plus sensibles à la dégradation.
- L'augmentation de la proportion de sodium échangeable est inquiétante. D'après les travaux de Keita (1996), une dégradation des propriétés physiques est déjà perceptible sur certains sols et se manifeste à partir d'une proportion proche de 7% de la CEC. Cette valeur pourrait être atteinte rapidement sur une importante partie des sols des périmètres.

Ces observations doivent être nuancées de différentes manières:

- notre connaissance des mécanismes mis en jeu reste imparfaite. Notamment, certaines valeurs de pH mesurées *in situ* sont sensiblement inférieures aux valeurs attendues. L'étude des mécanismes doit être approfondie.
- le fonctionnement hydrologique et la nature des sols sont variables et une situation moyenne ne peut rendre compte de cette diversité. Néanmoins, certains sols semblent susceptibles de se dégrader à un rythme plus élevé. Il s'agit notamment des sols sableux peu tamponnés, des sols en position topographique élevée dont la fraction de lessivage est faible, ou des sols influencés par une salure héritée.
- si la dégradation progressive des propriétés physico-chimiques paraît inéluctable sans une modification du fonctionnement hydrologique du milieu sous l'influence de l'irrigation et du drainage, son impact est plus difficile à cerner. En riziculture irriguée, les sels peuvent être lixiviés sous les horizons superficiels; ils pourraient ne s'accumuler qu'en profondeur sans préjudice notable sur les performances des cultures.

Conclusions

Le drainage naturel du milieu est faible, la fraction de lessivage a été estimée à 1/230. La nappe demeure en position sub-affleurante et facilite la concentration des solutés. Cette concentration est d'autant plus rapide que la perméabilité des sols est faible et que la maîtrise de l'eau est déficiente (notamment en position topographique élevé).

Une salinisation primaire semble être localement à l'origine d'une forte concentration de la nappe et de la solution du sol. Elle se retrouve principalement dans les zones de cuvettes et se manifeste par l'existence de nodules calcaires et l'apparition de salants blancs. Dans d'autres zones, la dégradation par alcalinisation est issue de la concentration des eaux d'irrigation; elle se manifeste par l'apparition de salants noirs.

Ces évolutions sont lentes mais n'en sont pas moins potentiellement dangereuse et méritent toute l'attention de la communauté scientifique et des opérateurs de développement. Elles sont étroitement liées au dysfonctionnement hydrologique du milieu ce qui suppose que les méthodes de prévention devront préférentiellement être identifiées dans le domaine de la gestion de l'irrigation et du drainage. Des investigations restent néanmoins nécessaires pour préciser la nature des mécanismes mis en jeu et réaliser une estimation prévisionnelle plus précise de la dégradation et de son impact sur la productivité des systèmes de cultures irriguées.

Bibliographie

- Appelo, et Postma, 1994. Geochemistry, groundwater and pollution, *Balkema ed., Amsterdam*
- B.R.E.S.S., 1996. Rapport de prospection géophysique dans le cadre de l'étude hydrogéologique du Pôle de recherche sur les Systèmes Irrigués (PSI) sur la zone de l'Office du Niger.
- Barral, J.P. et Dicko M.K., 1996. La dégradation des sols à l'Office du Niger, synthèse bibliographique. Travaux et études n°1, PSI-Mali, 40 p.
- Bertrand, R., K. N'Diaye, B. Keita, 1994. L'alcalinisation/sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. *Sécheresse*, 3:161-171
- Bertrand, R., B. Keita et K. N'Diaye, 1993. La dégradation des sols des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'office du Niger). *Cahiers agriculture*, 2:318-29
- Bertrand, R., 1986. Sodisation et alcalinisation des sols à l'office du Niger, *doc. IRAT*, Montpellier, 25 p.
- Bouwer, H. and Rice R. C., 1976. A Slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Ressource Research*, vol. 12, 3: 423-436.
- Coulibaly, M., 1989. Etude sur l'alcalinité et la sodicité des sols du projet Retail. *Doc. Office du Niger*, Ségou
- Coulibaly, M., 1988. Etude de la fertilité des sols du projet Retail, *mémoire ENS*, Bamako
- Dabin, B., 1951. Contribution à l'étude des sols du delta central nigérien. *L'agronomie tropicale*, 6(11-12), 606-637
- Dicko, M.K. et M.K. N'Diaye, 1994. Rapport volet salinisation. Caractérisation des sols irrigués, *doc. IER*, Bamako
- Droubi, A., 1980. Generalized residual alkalinity concept: application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Am. J. Sci.*, 280: 560-572
- Keita, B., 1996. Détermination des facteurs d'identification de la dégradation des sols par sidosation et alcalinisation à l'office du Niger, Mali. *DEA national de science du sol*, Nancy
- Keita, B., B. Kounkandji et L. Dioni, 1991. Etude morphologique du Kala inférieur au 1/20000, *doc IER*, Bamako, 81 p. + figures + annexes + cartes
- Marlet, S., V. Vallès et L. Barbiero, 1996. Field study and simulation of geochemical mechanisms of soil alkalization in the sahelian zone of Niger. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10:243-256
- Marlet, S., 1996. Alcalinisation des sols dans la vallée du fleuve Niger, Niger. Modélisation des

processus physico-chimiques et évolution des sols sous irrigation. *Thèse de doctorat, ENSA Montpellier*, 196 p.

Marlet, S., 1996. Salinity - Sodicity in the Punjab, Pakistan. *Technical report, CIRAD*, Montpellier

N'Diaye, K., E. Van Slobbe, Risselada et Y. Doumbia, 1990. Identification de l'alcalinisation/salinisation des sols de l'office du Niger. Doc. IER, Bamako

N'Diaye, M.K., 1987. Evaluation de la fertilité des sols à l'office du Niger (Mali). Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le kouroumari. *Thèse Doct. Ing., INP Toulouse*, 133 p.

Petit V., Vaubourg P., 1982. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des milieux aquifères peu perméables. Rapport B.R.G.M., 20 p.

Programme des Nations Unis pour le Développement, 1979. Etude géophysique par méthode électro-sismique du ranch de Niono. Rapport géophysique, 10 pages, 5 cartes.

Programme des Nations Unis pour le Développement, 1990. Synthèse hydrogéologique du Mali. Rapport, 300 p. Direction de l'Hydraulique et de l'Energie, Bamako, Mali.

Toujan, M., 1980. Aménagement hydroagricole dépendant du canal du sahel. Evolution des sols irrigués. *Doc. Office du Niger/SOGREAH*, Ségou

Tréa, C. Et E. Kharbotty-Rhill, 1990. Identification de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation des terres à l'office du Niger, 46 p., annexes

Valenza, A., 1996. Rôle des eaux souterraines et d'irrigation dans les processus de salinisation-alcalinisation des sols en zone sahélienne. Cas du Kala Inférieur (Delta Intérieur du Niégré, Mali). Diplôme d'Etudes Approfondies, Univ. Montpellier II, Fr., 75 p. et annexes.

Vallès, V. et F. Bourgeat, 1988. Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated sodic soils: I. Development of the thermodynamic model GYPSOL simulating the irrigation water - soil chemical interaction. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2:165-177

Vallès, V., M.K. N'Diaye, A. Bernadac, et Y. Tardy, 1989. Geochemistry of water in the kouroumari region, Mali. Al, Si and Mg in waters concentrated by evaporation: development of a model. *Arid soil research and rehabilitation*, 3:21-39

Vallès, V., R. Bertrand, F. Bourgeat et M.K. N'Diaye, 1989. Concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques; Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'ouest Medjerdah. *L'agronomie tropicale*, 44(3):157-163

Van Diepen, C., 1984. Projet ARPON. Les sols irrigués des casiers rizicoles de l'office du Niger au Mali. Rapport de mission.

Van Driel, W.F., 1989. Salinisation, alcalinisation et sodisation des terres à l'office du Niger. KIT, Amsterdam, IER, Bamako

Van Beek, C.G.E et N. Van Breemen, 1973. The alkalinity of alcali soils. *Journal of soil science*, 24(1):129-136

Van Hoorn J.W., 1992. Evaluation de la première phase au sujet de l'identification des problèmes d'alcalinisation/Salinisation des sols à l'Office du Niger et proposition pour une deuxième phase d'études et d'essai. Université Agronomique de Wageningen, 10 p.

Winja et Bruggenwert, 1994. Salinization and sodication of the soils in office du niger: a quantitative approach, *Wageningen Agricultural University*

ANNEXES

ARROSEUR N9 : suivi piézométrique

CE (micromhos)

	27-Mar	03-Avr	10-Avr	16-Avr	23-Avr	14-Mai	21-Mai	28-Mai	04-Jun	13-Jun	18-Jun	25-Jun	02-Jul	09-Jul	16-Jul	23-Jul
1	5260	5780	5550	5990	5400	5210	5030	4970	4950	5200	5050	4790	4870		4680	4690
2	5250	5610	5720	6010	5280	5400	5710		5510	5360	5400	5240	5330		4830	4780
3	7300	8520	8570	8850	8220	7960	7870	7110	7400	7600	7520	7860	7530		7400	7540
4	5250	5150	5050	5140	4600	5670	5730	5610	5310	5370	5140	5250	4800		5270	4980
5	2110	2080	2060	2200	1496	1461	1320	1287	1420	1800	2040	2580	1970	2720	2630	1790
6		1017	993	1027	900	910	970	1013	1027	1097	1013	1147	1060	1147	1007	1060
7	768	737	727	742	643	623	687	649	718	746	786	770	768	792	876	950
8	1431	2000	2340	2410	2200	2270	2800	2380	2220	2570	2910	2530	2890	2610	2680	2530
9		5740	6040	6240	5600	5570		5730	5810	5700	6190	6100	6370	6100	5910	5430
10	4430	5290	5050	5350	5030	4560	4880	4400	4720	4920	5160	5330	4950	4980	5240	5060
11	3070	3370	3100	3520		2890	2700	2360	2900	3210	3050	3180	3090	3170	3210	2940
12	1374	1900	1430	1910	1365	1347	1370	1443	1800	1900	1560	1840	1750	1790	2060	1790
13	1630	1464	1410	1830	1391	1336	1427	1496	1900	2100	1780	1900	1750	1820		2060
14	1333	1494	1202	1492	1328	1350	1456	1491	1840	2070	1750	1840	1800	1690	1880	1090
15	1364	1414	1411	1457	1432	1273	1352	1362	1760	1840	1620	1720	1630	1640	1790	1710
16	2160	1980	2230	2250	1920	1870	2040	1810	1890	2390	2170	2310	1780	2470	2020	1840
17	1127	1125	1090	1112	1088	1033	1016	927	1328	1090	1148	1193	1109	1149	1600	956

piezo hauteur en mètre par rapport au niveau du sol

	niveau sol	27-Mar	03-Avr	10-Avr	16-Avr	23-Avr	14-Mai	21-Mai	28-Mai	04-Jun	13-Jun	18-Jun	25-Jun	02-Jul	09-Jul	16-Jul	23-Jul
1	0.61	0.24	0.11	0.26	0.1	0.11	0.07	0.08	0.1	0.14	0.36	0.5	0.58	0.59	0.4	0.14	0.16
2	0.572	0.36	0.05	0.18	0	0	-0.03	0.01	0.1	0.06	0.36	0.42	0.59	0.61	0.43	0.47	0.32
3	0.674	0.14	0.07	0.21	0.05	0.08	0.03	0.1	0.11	0.12	0.47	0.56	0.75	0.75	0.57	0.37	0.22
4	0.338	0.08	0.03	0.06	0.04	0.04	0.19	0.23	0.22	0.25	0.38	0.5	0.6	0.46	0.3	0.43	0.31
5	0.332	0.09	0.02	0.06	0	0.01	-0.06	0.04	0.03	0.04	0.1	0.3	0.53	0.55	0.4	0.18	0.15
6	0.35	0.21	0.16	0.24	0.15	0.16	-0.02	0.1	0.12	0.15	0.21	0.41	0.25	0.27	0.17	0.28	0.14
7	0.28	0.42	0.43	0.44	0.41	0.36	0.05	0.26	0.2	0.28	0.3	0.32	0.05	0.1	0.03	0.06	0.05
8	0.358	0.11	0.08	0.11	0.14	0.18	0.34	0.42	0.38	0.41	0.32	0.48	0.41	0.3	0.21	0.3	0.09
9	0.579	0.1	0.05	0.05	0.02	0.01	0.03	0.08	0.07	0.12	0.33	0.54	0.66	0.45	0.22	0.33	0.24
10	0.567	0.22	0.15	0.1	0.03	0.06	0.02	0.06	0.05	0.15	0.36	0.55	0.73	0.74	0.47	0.62	0.61
11	0.565	0.53	1	0.74	0.76	0.04	0.01	0.03	0.03	0.11	0.34	0.56	0.77	0.79	0.56	0.65	0.63
12	0.485	0.09	-0.01	0	-0.09	-0.06	-0.09	-0.08	-0.05	0.02	0.35	0.44	0.57	0.58	0.37	0.2	0.09
13	0.5	0.06	0	0.02	-0.03	-0.02	-0.08	-0.02	-0.02	0.22	0.38	0.47	0.6	0.64	0.36	0.35	0.23
14	0.485	0.23	0.14	0.13	0.05	0.06	-0.03	-0.03	-0.01	0.03	0.2	0.34	0.49	0.6	0.57	0.56	0.62
15	0.409	0.36	0.26	0.25	0.14	0.15	0.02	-0.01	-0.01	0.05	0.17	0.24	0.35	0.46	0.43	0.46	0.51
16	0.594	0.2	0.19	0.15	0.27	0.27	0.39	0.5	0.47	0.48	0.38	0.5	0.5	0.43	0.29	0.45	0.21
17	0.645	0.22	0.17	0.18	0.15	0.13	0.07	0.13	0.14	0.19	0.35	0.45	0.7	0.57	0.4	0.55	0.51

alcalinité (eq/l)

	14/05	28/05	13/06	25/06	Piezo	K (m/s)
1	0.014	0.022	0.0145	0.02	P1	1.16E-06
2	0.0105	0.01	0.0076	0.01	P2	1.40E-06
3	0.019	0.018	0.017	0.021	P3	1.90E-06
4	0.0184	0.018	0.0125	0.019	P4	3.40E-06
5	0.0078	0.0088	0.008	0.0098	P5	8.60E-06
6	0.007	0.006	0.0058	0.0068	P6	3.00E-06
7	0.008	0.0095	0.007	0.006	P7	1.70E-06
8	0.01	0.011	0.012	0.012	P8	9.10E-07
9	0.011	0.011	0.011	0.014	P9	3.40E-07
10	0.0095	0.011	0.0106	0.014	P10	1.70E-06
11	0.018	0.018	0.02	0.019	P11	1.30E-06
12	0.012	0.012	0.014	0.0145	P12	1.90E-06
13	0.013	0.0105	0.0125	0.0128	P13	4.60E-06
14	0.016	0.013	0.015	0.0173	P14	3.90E-06
15	0.016	0.013	0.014	0.0155	P15	3.10E-06
16	0.0172	0.016	0.018	0.018	P16	1.30E-06
17	0.011	0.009	0.0116	0.011	P17	1.30E-06

ARROSEUR N4 : suivi piézométrique

	CE (micromhos)																
	22/03	02/04	09/04	15/04	22/04	08/05	13/05	20/05	27/05	03/06	12/06	17/06	24/06	1/07	08/07	15/07	22/07
1B	518	464	487	454	495	381	375	382	373	430	402	510	400	392	443	427	422
2A	217	207	200	237	91.2	81.5	108	133	137	212	171	181	174	225	161	192	160
2B	152	140	132	168	40.2	46.4	51.8	68.6	79.3	103	69	71.5	65.7	82.5	71.2	122.3	75
3A	601	576	555	556	456	477	455	516	528	517	552	553	573	568	548	570	516
3B	745	574	474	536	462	489	506	558	561	670	676	683	666	642	609	122.3	585
4A	544	-560	569	613	454	479	534	529	456	585	582	572	568	563	576	532	566
4B	700	750	760	820	684	672	730	700	666	808	783	806	811	790	759	817	714
5B	1005	982	1079	1153	1068	1129	1142	1103	1098	1384	1174	1324	1285	1333	1330	1315	1286
6A	590	537	526	563	434	340	311	505	414	469	434	495	483	437	474	511	484
6B	597	588	597	624	518	553	552	588	521	632	671	696	663	652	663	641	591
7A	518	508	494	547	406	419	427	449	423	590	499	500	616	502	574	515	510
7B	800	834	753	919	686	693	712	644	652	771	748	765	767	2060	762	766	741
8A	1048	815	842	878	802	997	742	787	702	822	951	840	812	782	766	964	879
8B	3080	3230	3190	1438	1437	1404	1332	2840	2700	2870	2840	2810	2850	2030	2650	2640	2120
9A	864	856	797	845	712	697	564	762	720	795	770	944	836	824	758	813	792
9B	547	487	456	464	375	485	702	634	656	758	722	734	633	623	661	624	597
10A	477	445	410	442	338	354	350	370	397	424	458	502	513	510	532	525	502
10B	441	444	456	452	324	336	358	396	405	490	503	571	589	581	588	599	525
11A	387	454	438	486	352	353	395	394	398	505	445	428	450	420	497	392	376
11B	111	97.6	80.6	96.4	0	0	5.2	11.5	29.6	56.6	15.4	23.5	14.8	23	42.7	52.4	13.7
12B	280	319	329	463	352	322	255	352	243	343	309	354	375	331	410	353	432

hauteur	Les hauteurs sont donnés par rapport au niveau du sol.																	
	sol	22/03	02/04	09/04	15/04	22/04	08/05	13/05	20/05	27/05	03/06	12/06	17/06	24/06	01/07	08/07	15/07	22/07
1B	294.4	0.49	0.38	0.41	0.39	0.38	0.24	0.15	0.31	0	0.29	0.34	0.11	0.07	-0.01	0.03	-0.1	0.01
2A	294.62	0.37	0.27	0.26	0.26	0.23	0.1	0.09	0.1	0.09	0.07	0.27	0.22	0.31	0.25	0.07	0.06	0.03
2B	294.62	0.39	0.1	0.16	0.13	0.11	0.04	0.08	0.09	0.05	-0.01	0.21	0.25	0.44	0.3	0.07	0.12	0
3A	294.8	0.51	0.38	0.42	0.37	0.35	0.25	0.13	0.15	0.16	0.18	0.28	0.28	0.32	0.31	0.14	0.13	0.12
3B	294.8	0.58	0.43	0.48	0.6	0.4	0.31	0.19	0.2	0.2	0.23	0.34	0.35	0.42	0.4	0.23	0.22	0.22
4A	294.83	0.36	0.31	0.31	0.27	0.24	0.14	0.1	0.09	0.08	0.12	0.27	0.23	0.26	0.32	0.07	0.07	0.08
4B	294.83	0.48	0.43	0.43	0.39	0.34	0.25	0.22	0.18	0.2	0.24	0.4	0.36	0.39	0.35	0.21	0.21	0.22
5B	294.9	0.23	0.25	0.26	0.44	0.19	0.11	0.08	0.03	0.08	0.19	0.34	0.32	0.29	0.26	0.12	0.16	0.13
6A	295.1	0.27	0.25	0.27	0.34	0.23	0.13	0.14	0.08	0.11	0.15	0.26	0.24	0.28	0.31	0.21	0.23	0.24
6B	295.1	0.24	0.24	0.27	0.19	0.2	0.12	0.14	0.11	0.1	0.18	0.26	0.27	0.3	0.32	0.2	0.23	0.26
7A	295.22	0.41	0.48	0.51	0.22	0.23	0.45	0.43	0.37	0.35	0.39	0.45	0.42	0.43	-0.06	0.23	0.27	0.28
7B	295.22	0.59	0.49	0.54	0.51	0.45	0.48	0.45	0.39	0.37	0.41	0.47	0.44	0.44	0.37	0.25	0.29	0.3
8A	295.45	0.75	0.78	0.84	0.81	0.74	0.8	0.77	0.7	0.67	0.71	0.75	0.72	0.71	0.63	0.54	0.59	0.58
8B	295.45	1.01	1	1.04	1.18	1.04	1.02	1.07	1.03	1.02	1.04	1.04	1.09	1.04	1.07	1.11	1.02	0.97
9A	295.05	0.23	0.2	0.24	0.14	0.15	0.08	0.06	0.03	0.03	0.08	0.18	0.16	0.19	0.21	0.11	0.17	0.17
9B	295.05	0.11	0.25	0.18	0.1	0.09	0.02	0.02	-0.04	-0.05	0.01	0.09	0.08	0.11	0.18	0.1	0.19	0.17
10A	295.27	0.52	0.47	0.5	0.43	0.45	0.35	0.39	0.36	0.36	0.41	0.48	0.47	0.53	0.54	0.44	0.45	0.45
10B	295.27	0.54	0.45	0.5	0.42	0.46	0.39	0.39	0.32	0.35	0.39	0.46	0.47	0.54	0.55	0.43	0.48	0.45
11A	294.68	0.37	0.26	0.28	0.26	0.23	0.13	0.01	0.05	0.06	0.08	0.12	0.11	0.16	0.13	-0.02	-0.02	-0.04
11B	294.68	0.14	-0.02	0.12	0.03	0.04	-0.03	0	0.07	0.01	-0.05	0.16	0.2	0.16	0.14	0	0	-0.01
12B	294.55	0.62	0.56	0.58	0.56	0.53	0.31	0.36	0.39	0.28	0.33	0.47	0.46	0.51	0.45	0.23	0.35	0.22

	alcalinité (equivalent par litre)					Piezo	K (m/s)	sable
	15/04	13/05	20/05	03/06	17/06			
1B	0.00516	0.0048	0.0052		0.006	A10	5.3E-06	48.2
2A	0.001548	0.0014	0.00192	0.002	0.002	A11	8E-07	47.3
2B	0.001548	0.0016	0.00192	0.002	0.00176	A2	2.3E-07	65
3A	0.005805	0.00464	0.006	0.005	0.007	A3	1.5E-06	57.8
3B	0.00645	0.0052	0.007	0.008	0.0075	A4	1.2E-06	56
4A	0.006192	0.0056	0.006	0.007	0.007	A6	3.6E-06	63.4
4B	0.00903	0.0072	0.008		0.0108	A7	2.5E-06	67.2
5B	0.01419	0.012	0.016	0.013	0.015	A8	8.1E-07	48.6
6A	0.005805	0.0048	0.006	0.006	0.006	A9	3E-06	66.1
6B	0.007095	0.0056	0.0086	0.008	0.008	B1	1.7E-06	44
7A	0.005805	0.00472	0.0063	0.006	0.006	B10	1.9E-05	50.8
7B	0.009675	0.009	0.009	0.009	0.0098	B11	9.5E-07	22
8A	0.010062	0.01	0.0095	0.01	0.0103	B12	2.5E-07	28
8B		0.022	0.0256	0.025	0.026	B2	2E-06	24
9A	0.009159	0.0072	0.009	0.0085	0.01	B3	9.5E-07	25.4
9B	0.005057	0.0064	0.0088	0.009	0.01	B4	8.5E-07	22
10A	0.00516	0.004	0.006	0.006	0.0061	B5	4E-07	17.4
10B	0.004747	0.00472	0.0067	0.006	0.0079	B6	4E-06	38.7
11A	0.00387	0.0044	0.006	0.006	0.006	B7	7.3E-07	19.1
11B	0.001032	0.0022	0.00128	0.0014	0.0016	B8	3.4E-08	27.9
12B	0.00516	0.0044	0.00472	0.004	0.00472	B9	1.6E-06	35.9

ARROSEUR N4 : suivi piézométrique

	CE (micromhos)																
	22/03	02/04	09/04	15/04	22/04	08/05	13/05	20/05	27/05	03/06	12/06	17/06	24/06	1/07	08/07	15/07	22/07
1B	518	464	487	454	495	381	375	382	373	430	402	510	400	392	443	427	422
2A	217	207	200	237	91.2	81.5	108	133	137	212	171	181	174	225	161	192	160
2B	152	140	132	168	40.2	46.4	51.8	68.6	79.3	103	69	71.5	65.7	82.5	71.2	122.3	75
3A	601	576	555	556	456	477	455	516	528	517	552	553	573	568	548	570	516
3B	745	574	474	536	462	489	506	558	561	670	676	683	666	642	609	122.3	585
4A	544	-560	569	613	454	479	534	529	456	585	582	572	568	563	576	532	566
4B	700	750	760	820	684	672	730	700	666	808	783	806	811	790	759	817	714
5B	1005	982	1079	1153	1068	1129	1142	1103	1098	1384	1174	1324	1285	1333	1330	1315	1286
6A	590	537	526	563	434	340	311	505	414	469	434	495	483	437	474	511	484
6B	597	588	597	624	518	553	552	588	521	632	671	696	663	652	663	641	591
7A	518	508	494	547	406	419	427	449	423	590	499	500	616	502	574	515	510
7B	800	834	753	919	686	693	712	644	652	771	748	765	767	2060	762	766	741
8A	1048	815	842	878	802	997	742	787	702	822	951	840	812	782	766	964	879
8B	3080	3230	3190	1438	1437	1404	1332	2840	2700	2870	2840	2810	2850	2030	2650	2640	2120
9A	864	856	797	845	712	697	564	762	720	795	770	944	836	824	758	813	792
9B	547	487	456	464	375	485	702	634	656	758	722	734	633	623	661	624	597
10A	477	445	410	442	338	354	350	370	397	424	458	502	513	510	532	525	502
10B	441	444	456	452	324	336	358	396	405	490	503	571	589	581	588	599	525
11A	387	454	438	486	352	353	395	394	398	505	445	428	450	420	497	392	376
11B	111	97.6	80.6	96.4	0	0	5.2	11.5	29.6	56.6	15.4	23.5	14.8	23	42.7	52.4	13.7
12B	280	319	329	463	352	322	255	352	243	343	309	354	375	331	410	353	432

hauteur	Les hauteurs sont donnés par rapport au niveau du sol.																	
	sol	22/03	02/04	09/04	15/04	22/04	08/05	13/05	20/05	27/05	03/06	12/06	17/06	24/06	01/07	08/07	15/07	22/07
1B	294.4	0.49	0.38	0.41	0.39	0.38	0.24	0.15	0.31	0	0.29	0.34	0.11	0.07	-0.01	0.03	-0.1	0.01
2A	294.62	0.37	0.27	0.26	0.26	0.23	0.1	0.09	0.1	0.09	0.07	0.27	0.22	0.31	0.25	0.07	0.06	0.03
2B	294.62	0.39	0.1	0.16	0.13	0.11	0.04	0.08	0.09	0.05	-0.01	0.21	0.25	0.44	0.3	0.07	0.12	0
3A	294.8	0.51	0.38	0.42	0.37	0.35	0.25	0.13	0.15	0.16	0.18	0.28	0.28	0.32	0.31	0.14	0.13	0.12
3B	294.8	0.58	0.43	0.48	0.6	0.4	0.31	0.19	0.2	0.2	0.23	0.34	0.35	0.42	0.4	0.23	0.22	0.22
4A	294.83	0.36	0.31	0.31	0.27	0.24	0.14	0.1	0.09	0.08	0.12	0.27	0.23	0.26	0.32	0.07	0.07	0.08
4B	294.83	0.48	0.43	0.43	0.39	0.34	0.25	0.22	0.18	0.2	0.24	0.4	0.36	0.39	0.35	0.21	0.21	0.22
5B	294.9	0.23	0.25	0.26	0.44	0.19	0.11	0.08	0.03	0.08	0.19	0.34	0.32	0.29	0.26	0.12	0.16	0.13
6A	295.1	0.27	0.25	0.27	0.34	0.23	0.13	0.14	0.08	0.11	0.15	0.26	0.24	0.28	0.31	0.21	0.23	0.24
6B	295.1	0.24	0.24	0.27	0.19	0.2	0.12	0.14	0.11	0.1	0.18	0.26	0.27	0.3	0.32	0.2	0.23	0.26
7A	295.22	0.41	0.48	0.51	0.22	0.23	0.45	0.43	0.37	0.35	0.39	0.45	0.42	0.43	-0.06	0.23	0.27	0.28
7B	295.22	0.59	0.49	0.54	0.51	0.45	0.48	0.45	0.39	0.37	0.41	0.47	0.44	0.44	0.37	0.25	0.29	0.3
8A	295.45	0.75	0.78	0.84	0.81	0.74	0.8	0.77	0.7	0.67	0.71	0.75	0.72	0.71	0.63	0.54	0.59	0.58
8B	295.45	1.01	1	1.04	1.18	1.04	1.02	1.07	1.03	1.02	1.04	1.04	1.09	1.04	1.07	1.11	1.02	0.97
9A	295.05	0.23	0.2	0.24	0.14	0.15	0.08	0.06	0.03	0.03	0.08	0.18	0.16	0.19	0.21	0.11	0.17	0.17
9B	295.05	0.11	0.25	0.18	0.1	0.09	0.02	0.02	-0.04	-0.05	0.01	0.09	0.08	0.11	0.18	0.1	0.19	0.17
10A	295.27	0.52	0.47	0.5	0.43	0.45	0.35	0.39	0.36	0.36	0.41	0.48	0.47	0.53	0.54	0.44	0.45	0.45
10B	295.27	0.54	0.45	0.5	0.42	0.46	0.39	0.39	0.32	0.35	0.39	0.46	0.47	0.54	0.55	0.43	0.48	0.45
11A	294.68	0.37	0.26	0.28	0.26	0.23	0.13	0.01	0.05	0.06	0.08	0.12	0.11	0.16	0.13	-0.02	-0.02	-0.04
11B	294.68	0.14	-0.02	0.12	0.03	0.04	-0.03	0	0.07	0.01	-0.05	0.16	0.2	0.16	0.14	0	0	-0.01
12B	294.55	0.62	0.56	0.58	0.56	0.53	0.31	0.36	0.39	0.28	0.33	0.47	0.46	0.51	0.45	0.23	0.35	0.24

alcalinité (equivalent par litre)							
	15/04	13/05	20/05	03/06	17/06		
1B	0.00516	0.0048	0.0052		0.006	Piezo	
2A	0.001548	0.0014	0.00192	0.002	0.002	A10	5.3E-06
2B	0.001548	0.0016	0.00192	0.002	0.00176	A11	8E-07
3A	0.005805	0.00464	0.006	0.005	0.007	A2	2.3E-07
3B	0.00645	0.0052	0.007	0.008	0.0075	A3	1.5E-06
4A	0.006192	0.0056	0.006	0.007	0.007	A4	1.2E-06
4B	0.00903	0.0072	0.008		0.0108	A6	3.6E-06
5B	0.01419	0.012	0.016	0.013	0.015	A7	2.5E-06
6A	0.005805	0.0048	0.006	0.006	0.006	A8	8.1E-07
6B	0.007095	0.0056	0.0086	0.008	0.008	A9	3E-06
7A	0.005805	0.00472	0.0063	0.006	0.006	B1	1.7E-06
7B	0.009675	0.009	0.009	0.009	0.0098	B10	1.9E-05
8A	0.010062	0.01	0.0095	0.01	0.0103	B11	9.5E-07
8B		0.022	0.0256	0.025	0.026	B12	2.5E-07
9A	0.009159	0.0072	0.009	0.0085	0.01	B2	2E-06
9B	0.005057	0.0064	0.0088	0.009	0.01	B3	9.5E-07
10A	0.00516	0.004	0.006	0.006	0.0061	B4	8.5E-07
10B	0.004747	0.00472	0.0067	0.006	0.0079	B5	4E-07
11A	0.00387	0.0044	0.006	0.006	0.006	B6	4E-06
11B	0.001032	0.0022	0.00128	0.0014	0.0016	B7	7.3E-07
12B	0.00516	0.0044	0.00472	0.004	0.00472	B8	3.4E-08
						B9	1.6E-06
							35.9

Conductivité électrique (microS/cm) des eaux de forage

Nom	Longitude	Latitude	CE
Babougou	-5.73	13.73	50
Babougou	-5.73	13.73	25
Babougou koroni	-5.72	13.78	40
Baguila	-6.17	13.95	45
Baguinta	-6.18	13.62	185
Bakmabg bazankele	-5.97	13.85	121
balibougou	-5.98	13.78	108
Balibougou	-5.98	13.78	108
Balle	-6.27	13.82	700
Balle	-6.27	13.82	800
Bambougou	-6.08	13.58	50
Banankoro	-6.17	13.50	53
Banankoro	-6.17	13.50	55
Banankoro	-6.17	13.50	60
Bani	-6.20	13.67	125
Bapho	-6.13	13.55	20
Barikoro	-5.87	14.72	350
Barikoro	-5.87	14.72	350
Bassan koura	-5.70	13.88	108
Bassan koura	-5.70	13.88	108
Bazanikele	-5.97	13.83	78
Biya	-5.98	13.53	370
Bolenka	-6.75	13.58	509
Bolenka	-6.75	13.58	380
Bolibana	-5.67	13.87	52
Bolibana	-5.67	13.87	46
Bossitomo	-5.93	14.68	160
Boua tintin	-5.70	13.62	432
Bougan	-6.20	13.57	242
bouho	-6.12	14.08	401
bouho	-6.12	14.08	445
Bouho	-6.12	14.08	460
bourgouko	-6.12	14.87	285
Bourgouko	-6.12	14.87	400
Boussin	-5.93	13.52	595
Boussin	-5.93	13.52	240
Boussin	-5.93	13.52	280
Boussin	-5.93	13.52	270
Bouya-were	-6.28	13.50	204
diaakoro	-6.27	13.75	1499
Diaakoro	-6.27	13.75	480
diabaly	-6.02	14.7	200
diabaly	-6.02	14.7	569
diadjan	-6.13	14.82	139
Diadjan	-6.13	14.82	140
Diado	-6.52	13.52	242
Diado	-6.52	13.50	1521
Diadou	-5.93	13.82	60
Diadowere	-5.92	13.90	200
Diamarabougou	-6.08	13.68	170
Diamarabougou	-6.08	13.67	240
diambe	-5.9	14.62	313
diambe	-5.9	14.62	185
Diambe	-5.90	14.62	210
Dianguinabougou	-5.97	13.65	90
Diassa	-6.02	13.83	140

Digani	-6.32	13.50	98
Digani	-6.32	13.50	225
diofolago	-6.07	13.78	103
Diofolago	-6.07	13.78	103
Dioro	-5.84	13.68	34
Dioro	-5.84	13.68	65
Dioro	-5.84	13.68	100
Dioro	-5.83	13.68	52
Dioro	-5.83	13.69	83
Dioro	-5.83	13.69	72
Dioro tinti	-5.83	13.63	115
Djedia	-5.69	13.90	140
Djibougou	-6.37	13.72	2290
Djibougou	-6.37	13.72	2400
Djibougou	-6.37	13.72	900
Dlablan	-6.35	13.73	900
Dlablan	-6.35	13.73	2600
Dlablan	-6.35	13.73	2150
Dlouguebougou	-6.45	13.83	539
Dlouguebougou	-6.45	13.83	666
Dlouguebougou	-6.45	13.92	1900
Dongali	-6.12	14.12	200
Dongali	-6.12	14.12	800
dossiguella	-5.9	13.85	39
Dougouba	-6.10	13.57	230
Dougouba	-6.10	13.57	55
Dougouba	-6.10	13.57	85
Dougouba	-6.10	13.57	190
Dougounikoro	-5.92	13.63	68
Dougounikoro	-5.92	13.63	106
dounguel	-5.98	14.75	172
Dounguel kogoni	-5.98	14.75	400
Famabougou	-6.22	14.78	420
Famoussabougou	-5.38	14.22	160
Fantambougou bambara	-6.63	13.52	1424
Fantambougou bambara	-6.63	13.52	645
farabougou	-6.13	14.88	785
farabougou	-6.13	14.88	1377
farabougou	-6.13	14.88	1803
farabougou	-6.13	14.88	1138
Farabougou	-6.13	14.88	2300
Farakou	-5.88	13.58	230
Farakou	-5.89	13.58	135
Fing	-5.48	14.67	430
Founougouni	-5.93	13.66	93
Gavantou	-6.78	13.77	470
goinkoungo	-5.97	13.6	466
Goinkoungo	-5.97	13.60	111
gomakoro	-5.92	13.77	83
gomakoro	-5.92	13.77	55
Gomakoro	-5.92	13.77	100
gouakolomba	-5.85	13.6	92
Gouakolomba	-5.85	13.61	177
Goudjikoro	-6.55	14.32	3600
Goudji-Tourela	-6.55	14.27	2000
Goudji-Tourela	-6.55	14.27	900
Goumadaga	-5.93	13.68	70
Herebougou	-6.20	14.55	290
Kaban	-6.18	13.60	90

Kala-Nampala	-5.86	14.15	625
Kala-Nampala	-5.86	14.15	396
Kala-Nampala	-5.86	14.15	745
Kama media	-6.03	13.55	220
Kama were	-6.02	13.53	520
Kana	-6.18	14.87	290
Kanabougou	-5.77	14.13	120
Kana Bougou	-6.03	14.03	600
Kandiourou	-6.13	14.58	310
Kango	-6.22	13.88	1050
Karako	-6.40	13.50	63
Kassolibougou	-6.15	14.07	600
Kefabougou	-6.30	13.57	389
Koke	-5.98	13.63	236
Koke	-5.98	13.64	528
Kokoro	-5.50	14.30	360
Kokoro	-5.50	14.30	240
Kolobele	-6.18	13.83	445
Kolodougou	-5.98	14.14	460
Kolomi	-5.72	13.63	348
Kolomi	-5.72	13.63	507
kolongo	-5.68	13.88	45
kolongo	-5.68	13.88	74
Kolongo	-5.68	13.88	77
Kolongo	-5.68	13.89	68
Koloni	-6.23	14.83	690
Koloni	-6.23	14.83	690
Koloni	-6.23	14.84	780
Komine	-5.88	13.65	90
Komine	-5.88	13.65	75
Konomani	-5.72	14.08	190
Konou	-5.93	13.68	95
Konou	-5.94	13.68	80
Konou	-5.93	13.68	55
kony-were	-6.32	13.72	304
Kony were	-6.32	13.72	2720
Kossabougou	-6.28	13.58	142
Kouabougou	-5.90	13.77	60
Kourmangoube	-6.03	14.90	700
Kouroukouna	-6.22	13.58	76
Koylai bamana	-5.75	13.65	256
Koylai bamana	-5.75	13.65	245
Koylai bamana	-5.75	13.65	263
Koyla markala	-5.75	13.63	215
Koyla markala	-5.75	13.64	310
Ladji were	-5.83	13.75	190
Louta coura	-5.73	13.88	159
Louta coura	-5.73	13.87	209
Macina	-5.73	13.98	90
Madina	-5.98	13.72	60
Magna	-6.37	13.61	228
Magna	-6.37	13.60	745
Markabibougou	-6.15	13.60	85
Markabibougou	-6.15	13.60	63
markabougou	-6.35	13.63	1500
Markabougou	-6.35	13.92	963
Markabougou	-6.35	13.92	1650
markala	-6.07	13.68	84
markala	-6.07	13.68	176

markala	-6.07	13.68	56
Markala	-6.07	13.69	90
Markala	-6.07	13.68	180
Markala	-6.07	13.68	600
Markala	-6.07	13.69	346
Marka tinti	-5.70	13.67	161
Marka tinti	-5.70	13.68	163
Mberewale	-6.05	14.05	200
Mobido were	-6.07	13.75	40
modibo-were	-6.07	13.75	52
mokompiela	-5.68	14.05	95
Moninnpebougou	-5.52	14.18	135
Moninnpebougou	-5.52	14.17	600
moninnpedougou	-5.52	14.15	88
m'pebougou	-6.05	13.65	69
M'pebougou sokala	-6.05	13.65	100
M'pebougou were	-6.05	13.65	95
M'pebougou were	-6.05	13.65	69
Mpewani	-6.03	13.92	180
Nadani	-6.15	14.03	100
Nakiri	-5.87	13.72	80
nampala	-5.6	15.37	662
nampala	-5.6	15.37	205
nampala	-5.6	15.37	182
Nango	-6.27	13.58	360
Nango	-6.27	13.59	440
Ndianibougou	-6.17	13.92	206
Ndiela	-6.57	13.65	2500
Ndofinana	-6.32	13.77	4430
N'dolla	-5.93	14.16	567
Neguebougou	-6.55	13.57	1695
Neguebougou	-6.55	13.58	1005
Nenekoro	-6.17	13.52	50
Ngolobabougou	-6.22	13.80	590
Niadougou	-6.10	13.78	70
Niaro	-6.48	13.73	600
Niarro coura	-5.72	13.87	96
Niepiena	-6.23	13.85	420
Niepiena	-6.24	13.85	890
Niepiena	-6.23	13.85	231
Nierela	-5.90	13.82	160
Nijobougou	-6.30	13.52	125
Nijobougou	-6.30	13.52	82
Nioh	-5.70	13.55	200
Nioh	-5.70	13.55	300
niono	-6	14.27	145
niono	-6	14.27	150
niono	-6	14.27	87
niono	-6	14.27	47
niono	-6	14.27	135
niono	-6	14.27	188
niono	-6	14.27	108
niono	-6	14.27	241
niono	-6	14.27	160
niono	-6	14.27	143
Niugon	-6.08	13.84	240
Ntontila	-6.63	14.20	200
Oueta	-6.58	13.63	2180
Oueta	-6.58	13.64	1434

Ouoloko	-6.50	13.58	671
Ouoloko	-6.50	13.58	130
Ouoloko	-6.50	13.58	164
Pogo	-5.90	13.90	542
Pogo	-5.90	13.90	150
Pogo	-5.90	13.90	568
rounde-madi	-5.97	14.72	118
Rounde madi	-5.97	14.72	320
Sabalibougou	-5.87	13.82	90
sabere-nodah	-5.88	14.73	154
sagala	-6.28	13.65	170
sagala	-6.28	13.65	126
sagala	-6.28	13.65	137
Sagala sagalani	-6.29	13.65	300
Sagala sagalani	-6.29	13.65	125
Sagala sagalani	-6.28	13.65	450
Sagala sagalani	-6.28	13.65	190
Sagala sagalani	-6.28	13.65	120
Sama	-5.75	13.73	77
Sama	-5.75	13.73	79
Samabougou sokala	-5.90	13.55	205
Samabougou sokala	-5.90	13.55	240
Samabougou sokala	-5.90	13.55	275
Samabougou sokala	-5.90	13.55	290
Samale	-6.40	13.63	439
Samale	-6.40	13.64	547
Samanko	-6.38	13.70	1200
Sanamadougou bamana	-5.93	13.83	10
Sanamadougou bamana	-5.94	13.83	65
Sanamadougou bamana	-5.94	13.83	65
Sanamadougou bamana	-5.93	13.83	10
Sangolola	-6.02	13.88	302
sansanding	-6.02	13.73	39
sansanding	-6.02	13.73	22
sansanding	-6.02	13.73	45
Sansanding	-6.02	13.73	45
Sansanding	-6.02	13.74	60
Santiguibougou	-5.49	14.18	140
Sarkala	-6.10	13.68	170
Sassa	-6.52	14.20	6000
Seguendara	-6.20	14.82	320
sienmo	-5.85	13.83	90
Sienmo	-5.85	13.83	90
Sienmo	-5.85	13.84	50
Siguiné	-5.86	14.10	486
soflebougou	-6.23	13.62	178
Soflebougou	-6.23	13.62	80
Sogobia	-6.35	13.50	235
Soke	-6.25	13.58	155
sokolo	-6.12	14.73	432
sokolo	-6.12	14.73	527
sokolo	-6.12	14.73	412
Sokolo	-6.12	14.73	700
Somonobougou	-6.12	13.58	70
Sonongo	-6.63	13.80	200
Sosse bozo	-5.80	13.75	90
Sosse bozo	-5.80	13.75	70
Sosse bozo	-5.80	13.75	60
Soungo	-5.98	13.73	250

subila	-5.88	13.78	115
subila	-5.88	13.78	142
Subila	-5.88	13.79	95
Subila	-5.88	13.78	100
Subila	-5.88	13.79	40
Taimana	-6.73	13.92	340
Taimana	-6.73	13.92	264
Tanbana	-5.88	13.90	127
Tantani	-6.55	14.45	2500
teguene	-6.22	13.78	288
Teguene	-6.22	13.78	240
Teguene	-6.22	13.79	180
Teguene	-6.22	13.78	240
Tekere	-6.50	13.70	740
Temou	-6.15	13.75	306
Temou	-6.15	13.75	61
Temou	-6.15	13.75	76
tesseribougou	-6.08	13.53	79
tesseribougou	-6.08	13.53	106
Thio	-6.33	13.72	640
Thosma	-5.00	13.90	260
Tibi 2	-5.73	13.57	194
Tibi were	-5.82	13.58	130
Tibi were	-5.82	13.60	253
Tibi were	-5.82	13.58	145
Tiemadeli	-6.08	14.15	50
Tiemba	-5.85	13.62	170
Tien bambara	-6.02	13.68	180
Tioba	-6.32	13.62	150
Tiongoba	-5.98	13.98	370
Tnongolola	-5.95	13.80	364
Togou	-6.00	13.58	240
Tomoba	-5.00	13.80	96
Tongolo coura	-5.75	13.83	84
Tongolo coura	-5.75	13.83	100
Touba	-5.77	13.52	260
Touba	-5.77	13.52	230
Toumacoro	-6.18	14.06	500
welintiguila-ba	-5.05	13.73	580
welintiguila-ba	-5.05	13.73	52
Welintiguila bozo	-5.05	13.73	40
Wena were	-5.75	13.60	230
Wena were	-5.75	13.60	215
Wena were	-5.75	13.60	180
Werekoura	-5.88	13.62	180
Weta	-6.60	13.63	2500
zanabougou	-6.07	13.55	136
zanabougou	-6.07	13.55	30
Zanabougou	-6.07	13.55	210
Zanabougou	-6.07	13.55	230

Composition chimique des eaux de nappe du continental terminal

(Données DNHE) - mmol/l

Nom	Long	Lat	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	CE	pH
niono	-6.00	14.27	0.107	0.140	0.130	0.054	0.183	0.003	0.439	0.003	47	7.6
modibo-were	-6.07	13.75	0.100	0.021	1.305		0.014		0.426	0.005	52	5.9
gomakoro	-5.92	13.77	0.140	0.062	0.152	0.005	0.042		0.639	0.003	55	6.3
Temou	-6.15	13.75	0.120	0.239	0.435			0.009	0.705	0.039	61	11.1
Karako	-6.40	13.50	0.160	0.041	1.218		0.197	0.003	0.148	0.010	63	6.0
markabougou	-6.35	13.92	0.200		0.435	0.005	0.056	0.001	1.000	0.003	63	6.2
kouroukouna	-6.22	13.58	0.160	0.119	1.957				0.803	0.005	76	6.1
Temou	-6.15	13.75	0.279	0.119	0.435	0.031	0.014	0.024	0.984	0.048	76	11.0
bazanikele	-5.97	13.83	0.140	0.062	0.609	0.003	0.056	0.001	1.000	0.003	78	6.3
balibougou	-5.98	13.78	0.180	0.099	0.435	0.041	0.042	0.096	0.738	0.003	80	6.7
niono	-6.00	14.27	0.160	0.177	0.257	0.051	0.042	0.005	0.739	0.011	87	7.2
diofolago	-6.07	13.78	0.240	0.119	0.435			0.053	1.361	0.003	103	6.5
balibougou	-5.98	13.78	0.160	0.160	0.039		0.028	0.152	0.623	0.003	108	6.3
niono	-6.00	14.27	0.180	0.259	0.122	0.102	0.056	0.003	0.918		108	7.3
rounde-madi	-5.97	14.72	0.299	0.378	0.435		0.338	0.014	1.295	0.229	118	7.4
tanbana	-5.88	13.90	0.259	0.140	0.013	0.033	0.028	0.035	2.984	0.003	127	7.2
niono	-6.00	14.27	0.200	0.280	0.135	0.153	0.085	0.021	1.115		135	7.7
diadian	-6.13	14.82	0.339	0.461	0.435	0.026	0.071	0.005	1.164	0.031	139	6.4
kossabougou	-6.28	13.58	0.359	0.280	0.957		0.085	0.003	2.000	0.016	142	7.0
niono	-6.00	14.27	0.205	0.247	0.539	0.141	0.056	0.037	1.344	0.002	143	7.2
niono	-6.00	14.27	0.259	0.218	0.231	0.064	0.226		0.836		145	6.8
niono	-6.00	14.27	0.299	0.181	0.257	0.097	0.169		1.033		150	7.1
sabere-nodah	-5.88	14.73	0.639	0.202			0.056	0.014	1.902	0.006	154	7.0
niono	-6.00	14.27	0.599	0.082	4.350	0.036	0.056		1.672	0.003	160	7.7
Ouoloko	-6.50	13.58	0.299	0.099	1.348	0.003	0.164	0.099	1.213	0.100	164	6.1
dounguel	-5.98	14.75	0.599	0.317			0.042	0.021	2.000	0.010	172	6.8
soflebourgou	-6.23	13.62	0.439	0.202	0.200	0.031	0.155	0.010	2.000	0.008	178	7.2
diambe	-5.90	14.62	1.140	0.021	0.435		0.113	0.011	1.770	0.053	185	6.4
niono	-6.00	14.27	0.259	0.321	0.291	0.082	0.268	0.003	1.016		188	7.1
diabaly	-6.02	14.70	0.267	0.588	0.304	0.100	0.141	0.260	0.980	0.024	200	6.4
Bouya-were	-6.28	13.50	0.299	0.461	2.784		0.028		2.016	0.005	204	7.4
Djibougou	-6.37	13.72	0.519	0.518	0.226		0.085	0.003	2.049	0.003	215	6.8
Magna	-6.37	13.61	0.359	0.399	0.826	0.031	0.113	0.179	1.557	0.032	228	6.5
niono	-6.00	14.27	0.559	0.642	8.264	0.010	0.085		2.574	0.003	241	7.6
bougan	-6.20	13.57	0.659	0.341	0.913	0.077	0.085	0.003	1.951	0.018	242	7.2
Diado	-6.52	13.51	0.739	0.300	4.350	0.033	0.141	0.014	2.197	0.016	242	6.8
bourgouko	-6.12	14.87	0.681	0.642		0.028	0.099	0.117	3.016	0.006	285	6.9
teguene	-6.22	13.78	0.599	0.321	0.565	0.038	0.338	0.173	1.492	0.023	288	6.9
Temou	-6.15	13.75	0.941	0.259	0.435	0.414	0.071	0.147	1.492	0.340	306	9.6
diambe	-5.90	14.62	1.000	0.440	0.435		0.310	0.078	2.016	0.166	313	7.9
tnongolola	-5.95	13.80	0.160	0.140	0.043		0.028	0.003	0.557	0.003	364	6.5
kefabougou	-6.30	13.57	0.639	1.160	1.957	0.003	0.127		3.557	0.018	389	7.6
kefabougou	-6.30	13.57	0.639	1.160	1.957	0.003	0.127		3.557	0.018	389	7.6
bouho	-6.12	14.08	1.140	0.378		0.031	0.197	0.128	3.607	0.052	401	7.0
Neguebourgou	-6.55	13.58	0.619	0.341	5.655	0.166	0.451	0.136	1.213	0.103	405	6.7
sokolo	-6.12	14.73	1.400	2.793		0.049	0.071	0.058	4.246	0.003	412	7.3
sokolo	-6.12	14.73	1.018	0.740	1.348	1.118	0.282	0.285	5.115	0.008	432	7.2
Samale	-6.40	13.63	0.818	1.497	2.740	0.701	0.451	0.163	3.705	0.219	439	7.9
kolobebe	-6.18	13.83	0.319	0.518	0.478		0.141	0.473	3.361	0.008	445	7.4
bouho	-6.12	14.08	2.181	0.058	0.435		0.197	0.030	4.590	0.003	445	7.3
sokolo	-6.12	14.73	1.060	3.040		0.724	0.268	0.237	2.787	0.052	527	7.5
Samale	-6.40	13.63	0.898	1.501	3.654	0.583	0.663	0.216	2.885	0.223	547	7.9

diabaly	-6.02	14.70	1.013	1.279	0.735	0.031	0.338	0.099	4.656	0.050	569	7.7
Ouoloko	-6.50	13.58	1.579	0.539	0.935	0.404	0.874	0.707	2.295		671	7.7
Magna	-6.37	13.61	1.899	0.099	2.175	0.038	0.296	0.186	3.295		745	7.5
farabougou	-6.13	14.88	1.739	1.218		0.064	0.635	0.765	0.492	0.013	785	6.0
markabougou	-6.35	13.92	1.739	0.461	4.350	0.013	0.663	1.834	8.279	0.040	963	7.5
Neguebougou	-6.55	13.58	0.699	1.900	2.610	0.090	0.578	2.100	4.082		1005	7.9
farabougou	-6.13	14.88	0.961	2.238		0.095	0.776	0.455	1.803	0.040	1138	7.7
farabougou	-6.13	14.88	1.240	3.394		0.332	1.805	0.638	1.016	0.168	1377	7.1
Oueta	-6.58	13.63	0.739	1.580	7.829	0.031	0.353	5.050	5.705	0.005	1434	7.6
markabougou	-6.35	13.92	1.659	2.818	5.872	0.015	4.795	0.627	8.180	0.019	1500	7.8
Diado	-6.52	13.51	1.639	2.715	35.668	0.174	3.103	2.552	8.525	0.081	1521	7.6
Neguebougou	-6.55	13.58	1.799	1.403	4.350	0.031	1.015	0.112	4.492		1695	8.3
farabougou	-6.13	14.88	2.979	3.056		0.107	2.666	1.276	0.836	0.074	1803	6.5
Djibougou	-6.37	13.72	4.419	3.653	2.175	0.120	0.042	17.542	4.361	0.013	2290	7.2
ndofinana	-6.32	13.77	6.659	7.968	11.309	0.115	4.090	23.921	6.066		4430	7.5
sansanding	-6.02	13.73	0.200	0.202	0.022	0.036	0.127	0.056	0.475	0.003	22	6.9
sansanding	-6.02	13.73	0.160	0.078	0.043		0.037		0.295	0.002	39	6.1
dossiguella	-5.90	13.85	0.140	0.062	0.435		0.028	0.003	0.492		39	6.0
kolongo	-5.68	13.88	0.107	0.103	0.130	0.031	0.056		0.443	0.006	45	7.6
sansanding	-6.02	13.73	0.160		0.039		0.056		0.377	0.003	45	6.0
welintiguila-ba	-5.05	13.73	0.100	0.099	0.435		0.324	0.003	0.426	0.003	52	6.2
kolongo	-5.68	13.88	0.102	0.132	0.165	0.031		0.003	0.738	0.003	74	6.1
gomakoro	-5.92	13.77	0.140	0.021	0.022		0.113	0.024	0.738	0.002	83	7.1
moninnpedougou	-5.52	14.18	0.259	0.222	1.022		0.042		1.295		88	5.8
mokompiela	-5.68	14.05	0.579	0.222	0.043	0.026	0.028	0.003	1.066	0.003	95	6.1
subila	-5.88	13.78	0.259	0.222	0.004		0.113		0.787	0.010	115	6.4
subila	-5.88	13.78	0.359	0.202	0.035		0.085	0.024	1.197		142	7.1
welintiguila-ba	-5.05	13.73	0.878	0.160	1.740	1.023	0.113	0.813	3.820	0.003	580	8.0
Banankoro	-6.17	13.50	0.120	0.078	0.104	0.033	0.056		0.426	0.011	53	5.3
markala	-6.07	13.68	0.122	0.181	0.139	0.049	0.085	0.014	0.520	0.016	56	7.5
Pogo	-5.90	13.90	0.140	0.103	0.544		0.042	0.003	0.836		68	6.0
m'pebougou	-6.05	13.65	0.160	0.399	0.435	0.028	0.056		0.705	0.026	69	7.0
tesseribougou	-6.08	13.53	0.279	0.082	0.435		0.028		0.705	0.052	79	6.7
markala	-6.07	13.68	0.359	0.041	0.783		0.099		0.951	0.024	84	6.5
sienmo	-5.85	13.83	0.200	0.119	0.478		0.056		0.787	0.003	90	6.7
gouakolomba	-5.85	13.60	0.220	0.140	0.091		0.028	0.003	0.787	0.005	92	6.4
tomoba	-5.00	13.80	0.439		0.091		0.071		0.951	0.003	96	7.2
tesseribougou	-6.08	13.53	0.359	0.280	0.130	0.020		0.009	1.016	0.013	106	6.6
goinkoungo	-5.97	13.60	0.359	0.440	0.435		0.014	0.030	1.066	0.023	111	6.7
bakmabg.-bazank	-5.97	13.85	0.259	0.099	0.022	0.008	0.071	0.003	2.984	0.003	121	6.5
zanabougou	-6.07	13.55	0.399	0.280	0.435		0.113		1.148	0.031	136	6.1
markala	-6.07	13.68	0.921	0.395	0.130			0.003	1.815	0.024	176	7.9
gouakolomba	-5.85	13.60	0.651	0.259	0.130	0.003	0.042	0.032	1.557	0.003	177	7.2
zanabougou	-6.07	13.55	0.719	0.160	0.435	0.013	0.127	0.005	1.815	0.052	230	7.5
koke	-5.98	13.63	0.619	0.140	4.350	0.031	0.508		0.754	0.135	236	5.7
tibi-were	-5.82	13.58	1.080	0.399	0.130		0.028	0.067	2.984	0.048	253	7.3
markala	-6.07	13.68	0.439	0.642	0.913	0.361	0.028	0.322	3.541	0.003	346	6.8
kolomi	-5.72	13.63	1.759	0.280	0.130			0.005	4.492	0.003	348	7.8
boua-tintin	-5.70	13.62	0.399	1.719	0.130		0.056	0.011	4.180	0.005	432	7.8
goinkoungo	-5.97	13.60	1.000	0.798	4.350	0.072	0.056	0.808	3.131	0.023	466	7.2
kolomi	-5.72	13.63	1.440	1.197	0.435	0.038	0.042	0.053	6.344	0.013	507	7.5
koke	-5.98	13.63	1.220	0.140	0.435	0.043	0.606	0.131	3.295	0.069	528	8.6
Pogo	-5.90	13.90	1.899	0.621	4.350	0.033	0.099	0.115	5.869	0.055	542	7.7
Pogo	-5.90	13.90	1.939	1.300	4.350		0.042	0.094	6.410	0.050	568	7.9
diaakoro	-6.27	13.75	1.719	2.365	8.264	0.079	2.595	4.412	6.967	0.055	1499	8.1

Hydrochimie des eaux Souterraines superficielles et de l'eau d'irrigation

(Données en meq/l)

Localisation	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	Origine
G	0.820	1.180	7.300	0.030	0.430	0.230	8.050	VanDiepen (1984)
G5	1.500	1.800	16.530	0.040	3.900	2.320	16.770	Winja et Brug. (1994)
N9 2	9.220	9.020	40.090	0.030	17.030	31.480	10.400	PSI (1996)
N9 3	3.970	15.230	74.390	0.030	21.300	53.110	18.320	PSI (1996)
N9 12	2.510	5.550	9.170	0.010	3.940	6.900	12.470	PSI (1996)
N9 17	0.850	1.550	10.110	0.800	0.810	1.700	10.160	PSI (1996)
KL3 8B	1.430	0.900	17.540	0.160	0.830	0.650	17.300	PSI (1996)
N4 16 8A	0.320	0.490	8.720	0.010	0.110	0.110	9.000	PSI (1996)
N4 16 5B	0.790	0.800	14.170	0.020	0.390	0.730	14.720	PSI (1996)
KL3 3A	2.230	1.470	7.740	0.010	0.220	0.250	10.520	PSI (1996)
N4 16 2A	0.780	0.350	1.490	0.100	0.340	0.610	2.020	PSI (1996)
Kouroumari	0.770	0.550	3.180	0.990	2.430	0.280	16.080	N'diaye (1987)
Kouroumari	3.400	2.000	5.120	0.660	0.960	2.130	9.850	N'diaye (1987)
Kouroumari	4.210	0.820	1.120	0.020	1.350	0.090	3.490	N'diaye (1987)
Kouroumari	1.690	1.090	3.830	0.520	0.140	0.130	4.670	N'diaye (1987)
Kouroumari	3.300	2.870	8.200	0.250	0.800	0.500	7.310	N'diaye (1987)
Eaux d'irrigation	0.182	0.141	0.204	0.034	0.013	0.008	0.589	Moyenne